

Titre: Modélisation des impacts des politiques de délestage dans une
Title: fonderie

Auteur: Ivan Dario Arciniegas
Author:

Date: 2006

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Arciniegas, I. D. (2006). Modélisation des impacts des politiques de délestage
Citation: dans une fonderie [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal].
PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/7702/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/7702/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:**
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MODELISATION DES IMPACTS DES POLITIQUES DE DÉLESTAGE DANS UNE
FONDERIE

IVAN DARIO ARCINIEGAS

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME

DE MAÎTRISE EN SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE INDUSTRIEL)

MAI 2006

© Ivan Dario Arciniegas, 2006.



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-17929-1

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-17929-1

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

MODELISATION DES IMPACTS DES POLITIQUES DE DÉLESTAGE DANS UNE
FONDERIE

présenté par: ARCINIEGAS, Ivan Dario

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. AGARD Bruno, Doctorat, président;

M. TRÉPANIÉ Martin, ing., Ph.D., membre et directeur de recherche;

M. BAPTISTE Pierre, Doctorat, membre.

RÉSUMÉ

Il existe actuellement une tendance mondiale à implanter des stratégies pour réduire les impacts négatifs de l'industrie sur l'environnement. Un des sujets qui a été abordé dans ce contexte est l'intérêt à réduire la consommation et le gaspillage des ressources énergétiques. Une des stratégies les plus utilisées pour dans ce contexte est le délestage énergétique. Le principal objectif du délestage est de contrôler la consommation en intervenant sur la demande énergétique lorsque celle-ci risque de dépasser certaines limites établies.

Le sujet de ce projet est la détermination de la meilleure politique à appliquer lors des opérations de délestage, dans le cas d'une usine énergivore. Le cas étudié est celui de l'usine de fabrication de tuyaux de la compagnie Wolverine, à Montréal. Actuellement, cette usine utilise un système de délestage que vise à maintenir les pointes de la demande d'énergie électrique au dessous d'un niveau accordé par Hydro-Québec, en vue de minimiser les pénalités financières liées aux dépassements. Ainsi, il est important pour l'usine de trouver la meilleure façon de maintenir des niveaux de production efficients en s'interdisant de dépasser les limites de consommation souscrites.

Dans la littérature, ce type de problème est souvent abordé en cherchant à trouver la solution optimale. Pourtant, dans un contexte réel, les divers paramètres qui font partie d'un système de production sont aléatoires et varient fréquemment, ce qui fait qu'il est peu pratique et trop coûteux de chercher à résoudre constamment les problèmes d'optimisation trop complexes que cela implique. Il est alors nécessaire d'établir des

politiques de délestage qui soient facilement utilisables et qui permettront d'atteindre des économies satisfaisantes, même s'elles ne sont pas optimales.

Un modèle de simulation a été construit avec le logiciel TaylorEd pour représenter le fonctionnement du système et les résultats ont été obtenus avec la politique de délestage actuelle de l'usine. À partir de ce modèle, plusieurs scénarios ont été construits, évaluant l'impact de différents paramètres du processus de délestage. Nous proposons 4 politiques de délestage:

- Politique 1 : La puissance disponible est réduite proportionnellement à chacune des lignes de production.
- Politique 2 : La puissance disponible est distribuée parmi les lignes en tenant compte d'une échelle de priorité selon les niveaux historiques d'utilisation de ces lignes.
- Politique 3 : La puissance disponible pour les lignes est distribuée parmi les lignes en tenant compte d'une échelle de priorité selon les temps des débuts des tâches.
- Politique 4 : La puissance disponible est réduite proportionnellement aux 3 lignes en tenant compte d'une estimation de la demande énergétique future.

Ces scénarios ont été évalués par rapport aux indicateurs suivants : consommation énergétique totale, volume de production, coût total et coût par unité de matériel (produit).

Les résultats obtenus montrent que la politique 3 est la meilleure car elle génère un coût unitaire de production inférieur. Nous avons trouvé que la politique numéro 4 donne de

meilleurs résultats que la politique 1, ce qui permet de penser que la stratégie d'essayer de prévoir la demande future dans le système de décision concernant le délestage peut effectivement améliorer le fonctionnement du système de production.

ABSTRACT

Due to the increasing importance of environmental concerns in the industry, manufacturing plants have found the need too establish cleaner and less polluting production systems, and find ways to reduce the unnecessary consumption of resources such as electricity one of the methods used to do so is Load Shedding which consists in intervening with the current when the demand surpasses a certain level. The subject of this research is to determine which load shedding policy permits to have better results in terms of savings in energy costs and maintaining satisfactory production levels.

This type of problem is often approached in the literature seeking to find an optimal solution. However this type of approach is rarely practical in a real context considering their high complexity and the need of manufacturing systems to find quick solutions on a constant basis. It becomes necessary to establish strategies easier to apply and that even if they will not necessarily obtain an optimal they will allow to find good enough approximations in less time.

Taking the practical case of the Wolverine manufacturing plant in Montréal as an example, a Simulation model was built using the software TaylorEd to represent the current configuration of the production system. based on this model, four policies of load shedding were proposed: reducing the power available equally among the different production lines, giving priority to those machine with higher levels of usage, establishing a priority according to times of beginning the tasks, reducing the power equally among the machines but using also an estimate of the future demand to decide

when the load shedding process must be started.

The results obtained showed that the third policy mentioned gave the better results permitting to have satisfactory production levels at a lower cost per unit produced. The fourth policy proved to give better results than the policy number one which means that using estimates of the future demand is a useful strategy to make the load shedding process more efficient.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	iv
ABSTRACT.....	vii
TABLE DES MATIÈRES.....	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xii
LISTE DES FIGURES	xiv
LISTE DES ANNEXES.....	xvii
CHAPITRE 1: INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2: DEFINITION ET CONTEXTE DU PROBLEME	3
2.1 Description du système.....	4
2.2 Le processus de délestage	8
CHAPITRE 3: REVUE DE LITTÉRATURE.....	11
3.1 Ordonnancement	11
3.2 Gestion de l'énergie	16
3.3 Délestage Énergétique.....	19
CHAPITRE 4: MÉTHODOLOGIE	24
4.1 Étapes.....	24

4.2	Modélisation mathématique	25
CHAPITRE 5: MODÈLE DE SIMULATION		28
5.1	Structure du modèle	28
5.1.1	Lignes de fonte	29
5.1.2	Découpage.....	30
5.1.3	Presses	31
5.1.4	Modélisation du délestage	32
5.1.5	Les temps de traitement	36
5.1.6	Les Indicateurs de performance	38
5.2	Données de simulation de Tuyaux Wolverine.....	39
5.2.1	Consommation de puissance	39
5.2.2	Temps de cycle, intervalles d'arrivée.....	39
5.2.3	Les employés	41
5.2.4	Presses	41
5.2.5	Extrusion	42
5.2.6	Tarification:	42
5.2.7	Formule du délestage	43
5.3	Construction des scénarios	44
5.4	Plan d'expériences.....	47
5.5	Scénarios Additionnels.....	49
CHAPITRE 6: RÉSULTATS		51
6.1	Résultats des scénarios de la classe 1.....	51

6.1.1	Consommation totale obtenue en modifiant la politique de délestage et le paramètre %début, puissance souscrite =10700kw	52
6.1.2	Volume de fonte.....	53
6.1.3	Coût total généré par la consommation énergétique :.....	55
6.1.4	Coût / lb fondues.....	56
6.2	Résultats des Scénarios de la classe 2.....	58
6.2.1	Consommation totale.....	58
6.2.2	Volume Traité (Lb Fondues).....	60
6.2.3	Coût Total.....	61
6.2.4	Coût par livre fondue.....	62
6.3	Impact du paramètre % début sur le système	63
6.4	Impact de la puissance souscrite sur le système.....	66
CHAPITRE 7: CONCLUSION		69
BIBLIOGRAPHIE.....		71
ANNEXES.....		76

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5.1 Temps de cycle du premier four.....	39
Tableau 5.2 Temps de cycle du deuxième four.....	40
Tableau 5.3 Temps de cycle du troisième four	40
Tableau 5.4 Temps de cycle du quatrième four	40
Tableau 5.5 Temps de cycle du cinquième four	41
Tableau 5.6 Puissance cumulée permise à chaque échantillon de 10 secondes (puissance souscrite = 10700 kWh)	43
Tableau 5.7 Puissance cumulée permise à chaque échantillon de 10 secondes.....	49
Tableau 6.1 Résultats du système actuel en variant le paramètre %début.....	64
Tableau 6.2 Résultats du système actuel en variant le paramètre Puissance souscrite ...	66
Tableau A.1 Résultats des scénarios de la classe A	76
Tableau A.2 Résultats des scénarios de la classe B	77
Tableau B.1 Résultats des scénarios de la classe A	78
Tableau B.2 Plan d'expériences de la classe B	79
Tableau D.1 TaylorEd Code Modules d'arrivée d'entités aux fours	86
Tableau D.2 Code File d'attente #1 aux fours	86
Tableau D.3 TaylorEd Code File d'attente #1 aux presses	87

Tableau D.4 TaylorEd Coulée	87
Tableau D.5 Code File d'attente #2 Avant la coulée.....	88
Tableau D.6 TaylorEd code Serveurs aux Fours	88
Tableau D.7 TaylorEd Code Processus du délestage Politique #4	89
Tableau D.8 TaylorEd Code de délestage, Fin de l'intervalle.....	90
Tableau D.9 TaylorEd Code de délestage, arrivée des entités Auxiliaires	90
Tableau D.10 TaylorEd Code de délestage, arrivée des entités Auxiliaires	90
Tableau D.11 TaylorEd Code de délestage, Fin de l'intervalle.....	91
Tableau D.12 TaylorEd Code Processus de délestage Politique #1.....	91
Tableau D.13 TaylorEd Code Processus de délestage Politique #2.....	94
Tableau D.14 TaylorEd Code Processus de délestage Politique #3.....	97
Tableau D.15 TaylorEd Code Processus de délestage Politique #4.....	100

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1: Schéma du Processus de production.....	6
Figure 2.2: Schéma de l'atelier	9
Figure 5.1 Modèle Global	28
Figure 5.2: Modèle d'une ligne de fonte à la fonderie.....	30
Figure 5.3 Modélisation de Découpage	31
Figure 5.4: Modèle Presse Ronto	31
Figure 5.5 Modèle Auxiliaire pour contrôler le Processus de délestage.....	32
Figure 5.6 Construction de scénarios pour le plan d'expériences.....	48
Figure 6.1: Consommation énergétique Vs Politique du délestage	52
Figure 6.2: Consommation énergétique Vs Politique du délestage	53
Figure 6.3: Production des fours vs Politique du délestage	54
Figure 6.4: Production des fours Vs Politique du délestage	55
Figure 6.5: Coût total Vs Politique du délestage.....	55
Figure 6.6: Coût total Vs politique du délestage.....	56
Figure 6.7: Coût par livre vs Politique du délestage	57
Figure 6.8: Coût par livre Vs Politique du délestage	57
Figure 6.9: Consommation énergétique Vs Politique du délestage	58

Figure 6.10: Consommation énergétique Vs Politique du délestage	59
Figure 6.11: Production des fours : Consommation énergétique Vs Politique du délestage.....	60
Figure 6.12: Production des fours : Consommation énergétique Vs Politique du délestage.....	61
Figure 6.13: Coût Total Vs Politique du délestage	61
Figure 6.14: Coût Total Vs Politique du délestage	62
Figure 6.15: Coût par livre vs Politique du délestage	63
Figure 6.16: Coût par livre Vs Politique du délestage	63
Figure 6.17: Coûts énergétiques pour la politique actuelle en modifiant le paramètre % début.....	64
Figure 6.18: Livres fondues avec la politique actuelle avec plusieurs valeurs pour le paramètre % début.....	65
Figure 6.19: Coût par lb avec la politique actuelle en utilisant plusieurs valeurs pour le paramètre % début.....	66
Figure 6.20: Coûts énergétiques pour la politique actuelle en modifiant la puissance souscrite.....	67
Figure 6.21: Coût par lb Vs Paramètre % Début	68
Figure C-1 Modèle taylorEd Four #1 et Données d'entrée	80

Figure C-2 Modèle taylorEd Four #1 et Four #2	81
Figure C-3 Modèle taylorEd Four #4 Four #5	82
Figure C-4 Modèle taylorEd Découpage	83
Figure C-5 Modèle taylorEd Presse # 1: Tuberie	84
Figure C-6 Modèle taylorEd Presse #2 Trefilerie	84
Figure C-7 taylorEd Submodèle auxiliaire, Control du délestage	85

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : TABLEAUX DE RESULTATS.....	76
ANNEXE B : PLAN D'EXPERIENCES	78
ANNEXE C : FIGURES MODELE DE SIMULATION EN TAYLOR ED.	80
ANNEXE D : CODE DE PROGRAMMATION DANS TAYLOR ED.....	100

CHAPITRE 1: INTRODUCTION

Suivant la tendance mondiale à donner de plus en plus importance à l'aspect environnemental, les industries ont dû s'adapter à de nouvelles conditions de production les obligeant à trouver des mécanismes et des stratégies pour réaliser leurs opérations d'une façon moins polluante et plus conforme aux attentes environnementales.

Au début, les industriels ont vu ces nouvelles exigences environnementales comme des coûts et des ennuis additionnels qui ne feraient que compliquer encore plus leur processus de production. Pourtant, ils ont fini par comprendre que le fait de maintenir des pratiques visant à réduire leurs impacts environnementaux pourrait être utilisé à leur avantage. Ces nouvelles dispositions leur ont permis de trouver des opportunités pour économiser des ressources et de l'argent en cherchant des moyens pour utiliser ces ressources d'une manière efficace et en économisant dans les processus particulièrement énergivores.

De fait, un des domaines qui a acquis une grande importance dans ce processus de conscientisation environnemental est celui de la réduction de la consommation d'énergie. Lorsque les compagnies ont commencé à chercher des façons d'optimiser leur consommation énergétique, elles se sont aperçues qu'il y avait d'énormes possibilités pour rendre les machines plus efficaces en réalisant une meilleure distribution des ressources. Ainsi, des efforts visant à réduire les pointes de consommation et à occuper les machines lors des baisses de demande énergétique ont permis obtenir des résultats satisfaisants.

Le sujet de ce projet est l'étude de la stratégie de la consommation d'énergie électrique utilisée par l'usine de tuyaux Wolverine à Montréal. Actuellement, cette usine utilise un système de délestage implanté qui diagnostique périodiquement l'état des niveaux de demande énergétique en les comparant avec les niveaux autorisés (soit les niveaux de pointe souscrits avec le fournisseur d'électricité Hydro-Québec). Dans le cas où les niveaux de pointe risquent d'être dépassés, le système de délestage intervient en réduisant la distribution de l'énergie sur certaines machines du système.

Une question nous vient à l'esprit : quelles sont les différentes façons de réaliser ce délestage énergétique? Quel impact aura-t-il sur le fonctionnement du système quant aux niveaux de production ? Ce projet vise à déterminer quelle politique de délestage est supérieure aux autres et quel mode de fonctionnement pourrait améliorer les résultats actuels.

Dans ce mémoire, nous expliquons d'abord le contexte de fonctionnement de l'usine étudié, puis examinons la littérature scientifique dans les domaines de l'ordonnancement, de gestion de l'énergie et de délestage énergétique ; ensuite nous expliquons la méthodologie utilisée suivi d'une description des modèles utilisés pour représenter les cas pratiques traités. Quatre politiques de délestage énergétique sont simulées en testant plusieurs combinaisons de paramètres. Les résultats obtenus sont comparés pour en déduire des conclusions sur la meilleure stratégie pour effectuer ce délestage

CHAPITRE 2: DEFINITION ET CONTEXTE DU PROBLEME

Dans le système de production étudié, l'usine de fabrication de tuyaux de Wolverine à Montréal, les temps de traitement des pièces dépendent de la consommation d'énergie associée. En temps normal, une quantité fixe de ressource(durée) est utilisée sur les machines pour traiter chaque type de pièce mais ici, nous pouvons faire varier les temps de processus en changeant la consommation d'énergie. Ainsi, pour accélérer le processus, on utilise la capacité totale des machines. Si on veut économiser de l'énergie, on peut assigner moins d'électricité aux machines, ce que induit une augmentation de la durée du processus proportionnelle à la quantité d'énergie délestée.

Dans un intervalle donné, les coûts associés à la consommation énergétique proviennent de deux facteurs : l'énergie totale consommée pendant la période et le maximum de puissance électrique appelée durant l'intervalle.

Actuellement, l'entreprise utilise un dispositif qui contrôle la consommation d'énergie en lui interdisant de dépasser un certain niveau maximum défini. Lorsque, à un instant donné, la consommation d'énergie demandée par le système arrive à ce maximum, un délestage est effectué pour redéfinir la quantité d'énergie disponible et traiter les commandes de l'usine avec des niveaux de consommations d'énergie inférieurs à ceux établis en conditions normales.

2.1 Description du système

L'atelier est composé de cinq « flow shops » en parallèle. Chacun traite des tâches différentes qui doivent suivre un ordre établi sur les machines qui le composent. Dans une deuxième section, le système comporte deux « flow shop » hybrides en parallèle. Ce sont des systèmes où les tâches doivent suivre plusieurs étapes dans un ordre spécifique, mais où, à chaque étape, il y a des machines disponibles en parallèle pour traiter les tâches. La demande de l'atelier est telle qu'en tout instant de nouvelles commandes arrivent et doivent être incluses dans le plan de production.

Le processus productif de l'usine comprend trois étapes principales :

1. La fonte du métal réalisée par des fours à induction. Ces fours produisent des lingots de métal qui sont ensuite transportés à l'une ou l'autre des étapes suivantes ;
2. La fabrication de barres à la tréfilerie ;
3. La tuberie pour la fabrication de tubes ;

Dans la fonderie, chacune des lignes est dédiée au traitement d'un type de métal différent et chacune utilise un type de four électrique différent avec diverses consommations d'énergie et de puissance. Les besoins de puissance habituels de chaque ligne sont les suivants :

- Ligne 1: 1 four, 2000 kW
- Ligne 2: 2 fours, 1000 kW chacun

- Ligne 3: 2 four, 800 kW chacun
- Ligne 4: 1 four, 450 kW
- Ligne 5 : 2 fours, 1000 kW chacun

De même, les presses utilisées dans le département de tréfilerie présentent une utilisation importante de la puissance disponible ainsi :

- La presse Monty est composée de 4 inducteurs utilisant 1000 kW de puissance chacun.
- La presse Ronto est composée de 4 inducteurs utilisant 750 kW de puissance chacun.

En réalité, les ateliers présentent un comportement stochastique, ce qui signifie que l'on doit tenir compte des conditions suivantes:

- les machines peuvent tomber en panne;
- les dates de disponibilité des jobs sont inconnues ;
- les durées des processus sont des variables aléatoires.

Le suivant schéma décrit la composition de l'usine:

processus de production et qu'en revanche il était celui qui appelait la plus grande part de la puissance, l'analyse de ce département permet d'en connaître plus sur les effets d'une diminution de puissance (Piroux, 2003). Il a d'abord été noté que si tous les fours de la fonderie entraient en fonctionnement en même temps, la fonderie ferait un appel de puissance maximal de 6500 kW. Un modèle de simulation a été développé par Piroux (2003) pour représenter le département de fonderie et évaluer le fonctionnement de l'usine avec différentes valeurs de puissance totale disponible. Les indicateurs de performance utilisés ont été le temps moyen de production par unité et les temps d'attente moyen des produits. Les résultats obtenus avec différents scénarios utilisant des valeurs allant de 3500 kW jusqu'à 6500 kW ont permis de conclure qu'en établissant un dispositif de puissance de 4500 kW au département de fonderie, il est possible d'obtenir des résultats similaires à ceux obtenus lorsque la puissance disponible est de 6500 kW. Une telle solution permettrait à l'entreprise de réduire les dépenses causées par les pointes d'appel de puissance générées à la fonderie.

Pourtant, même si la puissance disponible est restreinte à la fonderie, des pointes d'appel de puissance peuvent arriver de l'usine lorsque tous les inducteurs de la presse Monty et ceux de la presse Ronto sont en fonctionnement. Dans le pire des cas, on pourrait arriver jusqu'à des niveaux de 11500 kW suite à cette répartition:

- Fonderie : 4500 kW
- Presse Ronto: 4000 kW
- Presse Monty : 3000 kW

Une des limites du modèle de Piraux est l'hypothèse selon laquelle chaque inducteur ne fonctionne que lorsqu'il utilise toute la puissance spécifiée. Par exemple, selon le modèle, le four de la ligne 1 doit nécessairement utiliser 2000 kW pour être en fonctionnement. En réalité, les fours peuvent fonctionner avec des valeurs de puissance inférieures à celles qui ont été spécifiées comme conditions normales. Dans ce cas, les temps de traitement sont plus longs.

2.2 Le processus de délestage

Le processus de délestage actuel a été mis en place par l'ingénieur responsable de l'usine. Afin de mener à bien le processus de délestage, la moyenne de la puissance appelée dans la période est enregistrée à chaque intervalle de 15 minutes. Parmi les lectures de ces intervalles, la valeur la plus élevée servira pour calculer le coût associé à la consommation de puissance.

Le dispositif qui réalise le délestage de l'énergie vise à contrôler les appels de puissances moyennes à chacune de ces périodes de 15 minutes car cela correspond à la plus petite période mesurée pour la facturation par le producteur d'électricité. Ainsi, lorsqu'ils arrivent des appels de puissances supérieurs à la quantité souscrite par l'usine, le système réagit en réduisant la disponibilité de cette puissance pour équilibrer la consommation de l'intervalle et s'assurer que la moyenne de la période soit acceptable.

Pour ce faire, dans chaque période de 15 minutes, le système calcule à chaque intervalle de 10 secondes la puissance cumulée utilisée. Ensuite, il fait la comparaison avec la puissance qui aurait été consommée dans cet intervalle avec un appel constant de 10700

kW (le maximum souscrit par l'usine). Il y a ainsi une valeur maximale établie que la consommation cumulée ne doit pas dépasser pour chaque intervalle de 10 secondes dans la période de 15 minutes. Lorsque cette valeur est dépassée, la puissance disponible est réduite pour certaines machines (les fours des lignes 1,2 5 et les inducteurs de la tréfilerie).

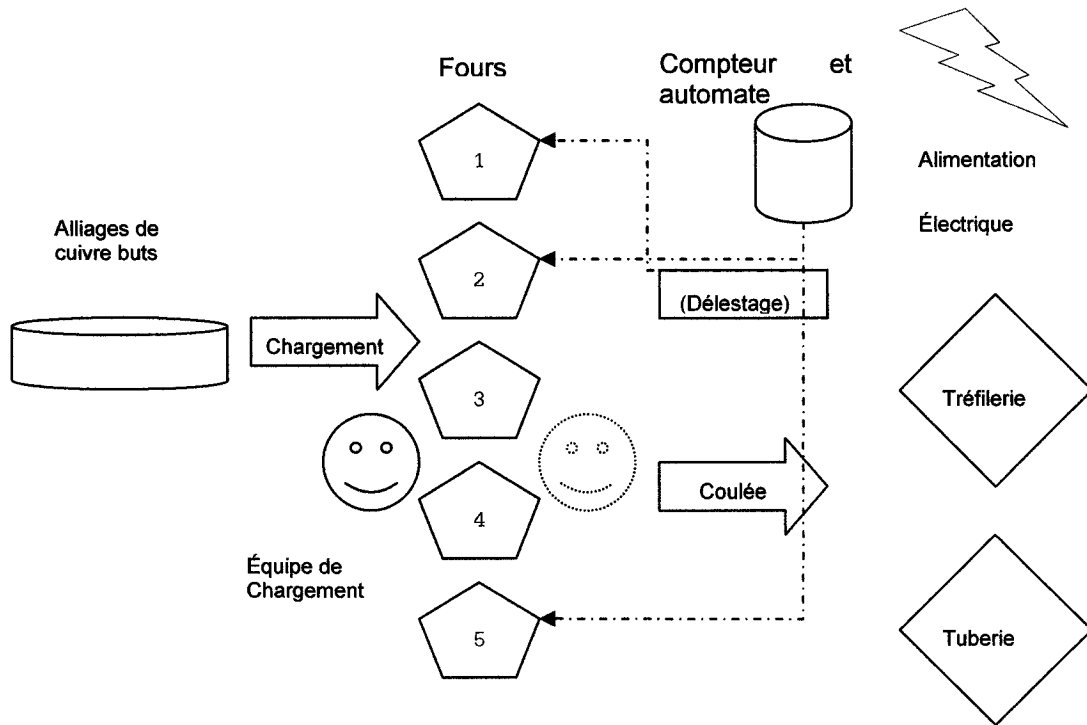


Figure 2.2: Schéma de l'atelier

La formule utilisée pour calculer ce délestage est la suivante:

$$M_t = \frac{1 - \left(\frac{\sum_{i,j} \sum_0^t U_{aijt}}{E_t} \right) c_{a,i,j}}{1 - D} - O$$

M détermine la proportion de la nouvelle puissance disponible pour les machines par rapport aux valeurs de puissance habituellement disponible. U représente la consommation de puissance d'une machine j du four 'a' faisant la tâche i à l'instant t. D et O (Début, Offset) sont des paramètres contrôlables qui déterminent à partir de quel niveau le délestage sera fait.

Actuellement, l'usine ne compte qu'un mode de délestage, soit la puissance réduite uniformément, et ne possède aucun moyen pour déterminer si une autre politique serait plus appropriée. C'est ce à quoi nous tentons de répondre dans ce mémoire.

CHAPITRE 3: REVUE DE LITTÉRATURE

Le problème auquel doit faire face un système de production de type « flow shop », où on doit établir un plan de gestion de l'énergie, comprend deux grandes parties :

- D'abord, il faut déterminer la manière avec laquelle les tâches seront organisées pour permettre que la production soit réalisée efficacement en respectant des contraintes tels que les fenêtres de temps, la disponibilité des ressources, les pannes, les temps de configuration, etc.
- D'autre part, les considérations et stratégies relatives à la consommation énergétique doivent être étudiées pour déterminer celles qui sont les plus adéquates selon les besoins et caractéristiques du système.

Dans la littérature, nous trouvons chacun des deux sujets traités isolément. Il est très rare de trouver des exemples où l'ensemble du problème ait été traité. En outre, dans la plupart des cas ces problèmes ont été examinés en visant à obtenir des solutions optimales, lesquelles ne sont habituellement pas applicables dans des contextes réels à cause de leur complexité.

Cette revue de littérature est structurée pour tenir compte de cette dualité.

3.1 Ordonnancement

Les processus d'ordonnancement de la production sont d'une grande importance dans le fonctionnement des industries. Ce concept peut s'appliquer à diverses situations, tant

dans le secteur manufacturier comme dans celui des services.

Ce problème peut être défini comme celui de trouver l'assignation adéquate des ressources disponibles à une série de tâches déterminées, sujettes à des conditions données comme par exemple : la capacité de chaque ressource, la séquence de ressources par lesquelles une tâche doit passer, la capacité de stockage entre les opérations, etc.

Dans le cas particulier que nous allons traiter, le système présente un comportement connu comme « flow shop ». Dans ce type de système, l'atelier compte un nombre de machines en série et toutes les tâches doivent être servies par chaque machine en suivant la même route. Chaque fois qu'une tâche a été servie par une machine, elle entrera dans la file d'attente de la machine qui suit selon la route établie précédemment. Ce cas est noté « Fm ».

Les problèmes d'ordonnancement de la production peuvent avoir un grand nombre de caractéristiques distinctes, ce qui fait que les problèmes peuvent être très différents selon les conditions considérées au moment de faire la modélisation. Les éléments qui caractérisent les tâches dans un système d'ordonnancement sont:

- le temps de traitement (p_{ij}) de la tâche j sur la machine i ;
- la date de disponibilité (r_j): moment où la tâche j est rendue disponible ;
- la due d'échéance (d_j), la date limite pour la fin de la tâche j ;
- les poids (w_j) qui expriment l'importance du travail j par rapport aux autres travaux

et qui agissent comme des facteurs de priorité de la tâche j par rapport au reste des tâches.

Gourgand, Grangeon et Norre (2003) proposent un algorithme récursif basé sur les chaînes de Markov pour calculer le « makespan » espéré dans un « flow shop » avec m machines. Cet algorithme est la généralisation de l'algorithme proposé par Cunningham et Dutta (1973) pour le « flow shop » de deux machines.

Le problème classique du « flow shop » déterministique cherche à trouver une permutation des tâches qui minimise un critère défini en considérant entre autres les hypothèses suivantes :

- les machines sont disponibles en tout temps ;
- on connaît les dates de disponibilité des jobs ;
- les temps des processus sont connus.

Gupta et al (2002) considèrent le problème du « flow shop » hybride où m tâches doivent suivre une route à travers n stations de travail, chacune de ces stations étant composée de plusieurs machines identiques. Chaque travail est associé à une date de disponibilité qui détermine l'instant où le traitement de la tâche peut commencer. La durée t_{ij} de la tâche i à la machine j peut être contrôlée en utilisant une ressource 'u' qui permet d'accélérer le processus. Ce temps est déterminé par la formule:

$$t_{ij} = t_{ij} + p_{ij} * u_{ij}$$

Où u_{ij} est la quantité de la ressource 'u' utilisée pour accélérer le processus de la tâche

'i' à la machine 'j', a_{ij} indique la contribution de chaque unité de la ressource 'u' à la diminution du temps de processus de la tâche 'i' à la machine 'j', et b_{ij} est le temps qui prendrait la tâche si le ressource "u" n'était pas utilisée.

La fonction objectif considérée comprend des coûts associés à l'utilisation de la ressource u, à la date de fin des tâches, aux coûts additionnels générés par les retards et aux coûts relatifs aux choix de dates de fin des commandes. Ce problème est np-complet et pour le résoudre des heuristiques basées sur des techniques d'insertion ainsi que des recherches locales ont été utilisées.

Lorsque le problème du "flow shop" comprend 3 machines ou plus, les flow shop de permutations (un ordre ne peut en aucun cas "doubler" son prédécesseur) ne sont plus dominants et il peut y avoir des solutions impliquant des ordres différents sur chaque machine qui donnent un meilleur résultat que n'importe quelle permutation. Trouver ces solutions est difficile, c'est pourquoi la littérature se concentre plutôt à trouver la meilleure permutation possible. Ce problème a été abordé en utilisant des algorithmes du « branch and bound » par divers auteurs tel que, entre autres, Ignal and Schrage (1965) et plus récemment Vander Belde (1990) et Chung , Flynn, Kirca (2002). Ces algorithmes sont limités à un nombre déterminé de machines, car le problème est également de complexité np-complet.

Dans la majorité de la littérature concernant ce sujet, le problème d'ordonnancement de la production des « flow shops » est abordé en construisant des modèles d'optimisation avec de nombreuses hypothèses et variables. Bien que ces modèles permettent d'obtenir

des solutions optimales, dans le monde réel ils sont souvent peu utilisés à cause de leur complexité, ce que les rend inutilisables pour les entreprises si on considère les contraintes des ressources et de temps dans lesquels les entreprises doivent établir leurs plans de production. C'est pourquoi il est important de considérer plutôt, à des fins industrielles, des méthodes plus simples qui soient réalisables dans un environnement réel.

Habituellement les usines manient un grand nombre de commandes différentes à la fois, et en reçoivent constamment d'autres. C'est pourquoi il s'avère peu pratique d'appliquer des algorithmes de haute complexité. En outre, dans beaucoup de cas, l'entreprise ne demande pas un ordonnancement optimal mais cherche principalement un ordonnancement réalisable qui satisfasse les délais de livraison.

La littérature traite largement des problèmes d'ordonnancement pour les cas où les temps de traitement des tâches sur les machines sont connus ou déterministes, ainsi que les problèmes dans lesquels les temps de traitement dans les machines suivent des distributions aléatoires non corrélées. Pour chacune de ces situations, différentes variantes ont été considérées comme l'existence de conditions d'antériorité, le blocus par la capacité de l'inventaire entre deux opérations, des conditions de permutation, etc.

Cheng et al (2000) ont étudié le problème d'une machine qui traite des tâches par séries (lots). À chaque tâche de la machine est associé un temps de réglage additionnel au temps de traitement de la série. En plus, il est possible d'utiliser des ressources supplémentaires afin de réduire les temps de traitement et de réglage. L'objectif est de

réduire le coût d'utilisation de cette ressource additionnelle en satisfaisant les dates d'échéance des commandes ; deux algorithmes basés sur la programmation linéaire sont présentés pour trouver la solution optimale avec des complexités $O(n^7)$ et $O(n^5)$.

Janiak et Kolivanov (1996) étudient le même problème et proposent un modèle linéaire pour le cas où les ressources additionnelles sont continues, et démontrent aussi que le problème est np-complet quand la ressource est discrète. Janiak et al. (2004) ont formulé un algorithme géométrique pour résoudre ce problème en temps polynomial.

Kolahan et Liang (1996) abordent le problème en ajoutant à la fonction objectif une pénalité pour les tâches finies trop tôt ; il y a des ressources qui peuvent être utilisées pour accélérer ou retarder le processus, la fonction objectif du modèle utilisée pour représenter le système devient non linéaire. Comme le problème est difficile à résoudre, une approche taboue est proposée en construisant le voisinage avec des substitutions de tâches dans la permutation.

Wang et Cheng (2003) analysent un problème similaire en utilisant comme fonction objectif une pondération des coûts associés aux ressources utilisées pour réduire les temps de configuration, à ceux utilisés pour modifier les temps de disponibilité, et au « make-span ». Une heuristique qui donne une solution réalisable avec une borne supérieure à la fonction objective est proposée.

3.2 Gestion de l'énergie

Le problème de la gestion énergétique a été traité dans le passé dans plusieurs contextes

visant à fournir aux opérateurs un outil qui leur permette d'avoir une information complète et en temps réel de l'état du système énergétique. Cette information concerne (Czuba et Lawrence, 1995) :

- l'état des lignes de transmission énergétique comme les indices de consommation totale ;
- les variations de la demande de l'énergie dans le temps et leurs impacts sur le fonctionnement des machines.

Dans certains exemples, la complexité des systèmes de transmission d'énergie fait de l'instabilité du voltage une affaire importante à considérer durant la planification de la production. Cela entraîne la nécessité de créer différentes stratégies et méthodes préventives pour affronter le problème ayant comme objectif de réduire l'impact des pannes subies et d'assurer la fonctionnalité du système même dans les situations critiques d'instabilité de la transmission d'énergie (Tseng, Chenet al. 1996).

La façon dont ces procédures fonctionnent est de calculer périodiquement la proximité des niveaux de consommation d'énergie du système avec les limites tolérables connus par anticipation. Selon ces valeurs, le système de contrôle informe l'opérateur qu'il est nécessaire d'intervenir sur la distribution actuelle d'énergie en modifiant des paramètres dans le système pour éviter de dépasser le niveau limite.

L'implantation des systèmes de gestion de l'énergie peut avoir un impact remarquable sur le rendement d'un système de production car elle offre de l'information qui peut être décisive dans la prise de décisions et qui se traduira en résultats supérieurs en termes de

niveaux de production et d'économies dans la consommation de ressources. Selon Pal et Huff (2000), entre autres choses, un système de management de l'énergie permet:

- de connaître de quelle façon l'énergie est dépensée et distribuée dans les différentes machines de l'usine ; c'est un outil pour déterminer le niveau d'efficacité des différentes processus du système de production en termes de consommation énergétique et pour trouver des inconsistances et des erreurs qui causent des dépenses d'énergie inutiles ou exagérées ;
- de contrôler des pointes de niveaux de consommation ; cela peut représenter des économies considérables car les pointes interviennent directement dans le calcul des coûts relatifs à la consommation énergétique ;
- de réagir en faisant du délestage ; en ayant des dispositifs vérifiant la consommation énergétique, il est possible d'établir des stratégies adéquates de délestage pour contrôler les niveaux de consommation énergétique et pour réagir efficacement aux imprévus tels que les instabilités de voltage ou la perte temporaire d'une partie des générateurs, etc.
- d'utiliser plus efficacement des ressources ; connaissant les niveaux de consommation, le gestionnaire peut déterminer à chaque instant si des machines sont sous-utilisées et si il est possible de leur assigner une charge inférieure à l'habituelle sans avoir de conséquences négatives;
- de faire la maintenance; le système de gestion de l'énergie peut être utile aussi pour alerter en cas de panne ainsi que pour prévoir des besoins de maintenance sur les

machines du système.

Parmi les outils utilisés pour faire la gestion de l'énergie il y a deux types de techniques principalement utilisés selon Elsabey (1998) : intrusive et non intrusive. Dans la gestion de l'énergie intrusive, l'outil donne au contrôleur la possibilité de fermer ou d'allumer des machines ou éléments du système qui consomment de l'énergie. De cette manière, les cycles de consommation de ces machines sont modifiés et cela permet un contrôle sur le profil de consommation d'énergie. En conséquence, les pointes peuvent être contrôlées pour les maintenir dans des limites désirées. Les techniques non intrusives, elles, n'interviennent pas directement dans les consommations des machines. Nous pouvons citer par exemple les programmes d'économies de l'énergie et la modification des habitudes générales de consommation

Les stratégies le plus souvent utilisées par les systèmes de gestion de l'énergie selon Hazarika et Sinhe(1998) sont: réduction de pointes (clipping), conservation de l'énergie, remplissage des chutes de consommation, délestage énergétique et rechargement énergétique.

3.3 Délestage Énergétique

La gestion de l'énergie est devenue une affaire très importante à considérer dans les systèmes productifs à cause de l'augmentation des coûts et des limitations qui sont survenus avec les nouvelles tendances économiques et environnementales. Des stratégies sont apparues pour faire face à ce nouveau défi visant toujours à maintenir le contrôle sur l'usage énergétique et à réduire les coûts inutiles. Le plus simple serait de

pouvoir compter avec une source illimitée d'énergie disponible pour le fonctionnement d'une usine. Ce scénario n'est pas réaliste pour diverses raisons ; entre autres à cause de la capacité de lignes de transmission d'énergie et de la structure de facturation des compagnies fournissant l'énergie, lesquelles établissent les coûts de l'énergie consommés en fonction des pointes de consommation.

Le délestage est l'une des méthodes les plus efficaces pour réagir quand la demande énergétique est supérieure à la capacité de système. Les cas principaux dans lesquels une usine doit implémenter un système du délestage sont (Czuba, Lawrence, 1995):

Perte de génération: lorsqu'un système perd une source d'énergie, la demande doit être satisfaite par le reste. Cela exigera plus que d'habitude aux générateurs restants et dans plusieurs cas leur capacité ne sera pas suffisante. Il sera donc nécessaire de réduire la quantité d'énergie individuelle à servir aux machines ou aux ressources pour éviter un arrêt total dans le déroulement des processus les plus importantes du système de production. Dans certains cas, une échelle de priorités est établie selon l'importance des processus et le délestage est réalisé d'abord sur ceux pour lesquels l'impact est moins critique.

Baisse de fréquence: à cause de la complexité des systèmes énergétique, il y arrive parfois des instabilités de voltage qui peuvent occasionner des baisses de fréquence qui, par la suite, peuvent affecter le système en générant des valeurs de fréquence inférieur aux limites inférieures de fonctionnement des machines.

Surcharge: lorsque le système présente une demande d'énergie plus élevée que celle de

la capacité de lignes de transmission d'énergie, le système ne pourra satisfaire la demande totale et peut même risquer d'endommager quelques-unes des lignes. Pour cette raison, il est alors plus convenable de réaliser un délestage et offrir aux machines une quantité d'énergie inférieure à celle qu'elles demandent.

Perumal et Ying(2004) présentent l'exemple d'un modèle de délestage pour un complexe de raffinerie. Ils commencent par établir le niveau maximum prévu de la surcharge et ensuite ils proposent un plan du délestage à faire dans diverses étapes. Dans chaque étape du processus une partie du surplus de la demande énergétique est coupé jusqu'à ce que la demande revienne aux niveaux que la capacité du système peut satisfaire. Ils vérifient la fonctionnalité de leur modèle en utilisant de la simulation et en essayant différents scénarios et valeurs pour la quantité de délestage à faire à chaque étape du processus de délestage.

Wang, Ejebe, Tong et Waight (1998) ont suggéré un modèle d'optimisation pour résoudre le problème. Il a comme fonction objectif la minimisation des coûts de contrôle du processus de délestage. Le modèle est sujet aux contraintes des équipes et du système ainsi qu'aux contraintes permettant de garder des marges de sécurité appropriées en ne permettant pas que la consommation s'approche trop des limites permises. Dans ce cas, les coefficients de la fonction objectif sont des valeurs choisies au moment de modéliser et qui servent à déterminer quels éléments de contrôle auront le plus d'impact sur le fonctionnement du système.

Cette stratégie est statique car elle obtient une solution pour un état final du système et

la solution est composée par des valeurs de paramètres qui ne seront pas modifiés dans le temps. En d'autres mots, cette stratégie ne tient pas compte du temps et en conséquence donne une solution à maintenir constante pendant que le système est en fonctionnement.

Chattopadyay et Chakrabarty (2003) ont développé un modèle de programmation non linéaire. Ils abordent le problème en essayant d'obtenir comme résultat la durée adéquate du délestage satisfaisant des marges de stabilité minimales ainsi que le reste des contraintes implicites du système. Dans leur étude, les auteurs ont considéré et comparé différentes options pour l'objectif à optimiser tels que les coûts de contrôle, le nombre de contrôles réalisés et la durée maximale des délestages. De cette façon ils ont démontré que le modèle statique peut être développé pour inclure la nature dynamique du problème. Ils ont trouvé que la sélection de la fonction objectif a un impact considérable dans la configuration résultante. Ceci indique que l'opérateur doit être conscient de ce qu'il souhaite améliorer lorsqu'il décide d'implanter un système de prévention. Avec une configuration donnée, le système peut donner des résultats meilleurs par rapport à certain indicateur de performance mais pas nécessairement les bons résultats pour les autres indicateurs.

Talukdar et Sinha (2005), conscients de l'importance de réagir rapidement lorsqu'une éventualité arrive, remarquent que même si pour résoudre le problème un programme mathématique pourrait obtenir les résultats les plus exacts, cette méthode n'est pas pratique à appliquer dans le monde réel. Elle est informatiquement coûteuse et prend

trop de temps pour trouver les solutions nécessaires pour maintenir la fonctionnalité du système. En conséquence, ils proposent une méthode moins exacte mais plus rapide pour trouver des solutions sous-optimales qui permettront de maintenir l'utilisation des lignes de transmission d'énergie à un niveau acceptable et qui ne provoqueront pas l'arrêt du système.

Leur méthode consiste à diagnostiquer périodiquement le système en vérifiant qu'aucune des lignes ne soit surchargée. Lorsqu'une telle situation arrive, l'excès d'énergie sur la ligne surchargée est redistribué entre les lignes voisines, en tenant compte de la proximité de ces lignes et des nœuds où cette demande d'énergie était originalement destinée. La méthode s'assure de ne pas dépasser les limites acceptables de charge pour ces lignes voisines. Dans le cas où cette redistribution ne peut être faite sans respecter les capacités, il est nécessaire de déclencher un système de délestage. Ce délestage est prioritairement appliqué sur les lignes dont le coût de transport est le plus élevé et sur celles dont le chemin vers les nœuds de destination est le plus long, de telle façon que les coupures énergétiques réalisées dans les délestages aient un impact mineur sur le fonctionnement du système.

CHAPITRE 4: MÉTHODOLOGIE

4.1 Étapes

La méthodologie suivie dans ce projet a été la suivante :

D'abord une modélisation mathématique du problème est présentée. La fonction objectif vise à minimiser le coûts relatifs à la consommation énergétique. Les variables sont les dates de début des tâches ainsi que les quantités d'énergie allouées à chaque machine du système dans le temps. Ce modèle sert à caractériser le système. Étant donné sa complexité, il sera peu pratique en réalité car sa résolution est trop difficile et son implémentation dans l'usine serait pratiquement impossible vu les différents éléments stochastiques.

Ensuite, un modèle de simulation a été construit avec le logiciel TaylorEd pour représenter le fonctionnement du système et les résultats obtenus avec le politique de délestage actuelle tel qu'elle est utilisé présentement dans l'usine. Cette modélisation implique plusieurs collectes de données à l'usine.

En partant du modèle original, plusieurs scénarios différents ont été modélisés, couplés à différentes politiques de délestage. Pour chacun de ces scénarios, divers indicateurs de performance ont été évalués. Tant pour le modèle original que pour les scénarios alternatifs, le modèle a été évalué dans deux cas différents: premièrement, en considèrent seulement les dépenses générées par les machines faisant partie du système de production et ensuite en ajoutant une consommation fixe additionnelle représentant la

consommation constante dans l'usine (bruit de fond).

Finalement, les résultats obtenus avec les différents modèles ont été comparés par rapport aux divers indicateurs de performance afin d'en arriver à une interprétation.

4.2 Modélisation mathématique

Bien que la modélisation mathématique ne soit pas le fruit de ce travail, il est intéressant d'en examiner la complexité afin de justifier l'utilisation d'un outil de simulation. Ce modèle a été établi en collaboration avec Hait (Trepanier et al. 2005).

Étant donné

- d_i : date de livraison du travail i ($i \in [1;n]$)
- r_i : date de disponibilité du travail i .
- x_i^t : vaut 1 si l'opération de chargement du travail i commence à la date t ou avant.
- y_i^t : vaut 1 si l'opération de déchargement de i commence à la date t ou avant.
- I_j : ensemble des travaux affectés au four j .
- A_j : relations de précédence des travaux de I_j . $A_j = \{(i_1, i_2) | i_1 \text{ précède } i_2 \text{ dans } j\}$.
- q_i^t : quantité d'énergie restant à apporter pour la fonte du travail i au temps t .
- e_i^t : puissance allouée au four j durant la période t pour le travail $i \in I_j$.
- e_{jmin} : puissance mini/maxi allouable à j
- e_{jmax} : durant la fonte ou le maintien.
- sq_i^t : vaut 1 si de l'énergie est apportée pour la fonte du travail i au temps t .
- se_u : consommation d'énergie durant l'intervalle u .
- dep_u : dépassement de la puissance maxi autorisée durant l'intervalle u .

la fonction objectif est alors :

$$\min(f_1 \cdot P + f_2 \cdot \sum_u se_u + f_3 \cdot \sum_u dep_u)$$

sujet à

- (1) $x_i^t \leq x_i^{t+1}$ $\forall i \text{ et } \forall t \in [r_i; d_i - pd_i - pc_i - 2]$
- (2) $y_i^t \leq y_i^{t+1}$ $\forall i \text{ et } \forall t \in [r_i + pc_i; d_i - pd_i - 2]$
- (3) $x_i^t = 0$ $\forall i \text{ et } \forall t \leq r_i - 1$
- (4) $x_i^t = 1$ $\forall i \text{ et } \forall t \geq d_i - pd_i - pc_i$
- (5) $y_i^t = 0$ $\forall i \text{ et } \forall t \leq r_i + pc_i - 1$
- (6) $y_i^t = 1$ $\forall i \text{ et } \forall t \geq d_i - pd_i$
- (7) $x_{i2}^t \leq y_{i1}^{(t-pdi)}$ $\forall t, \forall j \text{ et } \forall (i1, i2) \in A_j$
- (8) $q_i^{(ri+pci)} = q_i^0$ $\forall i$
- (9) $q_i^{t+1} = q_i^t - e_i^t$ $\forall i, \forall t \in [r_i + pc_i; d_i - pd_i - 2]$
- (10) $e_i^t \leq e_{jmax}.(x_i^{(t-pci)} - y_i^t)$ $\forall j, \forall i \in I_j, \forall t \in [r_i + pc_i; d_i - pd_i - 1]$
- (11) $e_i^t \geq e_{jmin}.(x_i^{(t-pci)} - y_i^t)$ $\forall j, \forall i \in I_j, \forall t \in [r_i + pc_i; d_i - pd_i - 1]$
- (12) $e_i^t = 0$ $\forall i, \forall t \in [0; r_i + pc_i - 1] \cup [d_i - pd_i; T - 1]$
- (13) $sq_i^t \cdot q_i^0 \geq q_i^t$ $\forall i, \forall t \in [r_i + pc_i; d_i - pd_i - 1]$
- (14) $sq_i^t + y_i^t \leq x_i^{(t-pci)}$ $\forall i, \forall t \in [r_i + pc_i; d_i - pd_i - 1]$
- (15) $\sum_i [(x_i^t - x_i^{(t-pci)}) + (y_i^t - y_i^{(t-pdi)})] \leq R$ $\forall t \in [0; T - 1]$
- (16) $se_u = \sum_{\tau=N.u}^{N(u+1)-1} \sum_i e_i^\tau$ $\forall u \in [0; U]$
- (17) $dep_u \geq se_u - 1, l.P$ $\forall u \in [0; U]$
- (18) $dep_u \geq 0$ $\forall u \in [0; U]$
- (19) $x_i^t \in \{0; 1\}$ $\forall i, \forall t \in [r_i; d_i - pd_i - pc_i - 1]$
- (20) $y_i^t \in \{0; 1\}$ $\forall i, \forall t \in [r_i + pc_i; d_i - pd_i - 1]$
- (21) $sq_i^t \in \{0; 1\}$ $\forall i, \forall t \in [r_i + pc_i; d_i - pd_i - 1]$
- (22) $q_i^t \in \mathbb{R}$ $\forall i, \forall t \in [r_i + pc_i; d_i - pd_i - 1]$
- (23) $e_i^t \in \mathbb{R}^+$ $\forall i, \forall t \in [r_i + pc_i; d_i - pd_i - 1]$
- (24) $se_u \in \mathbb{R}^+$ $\forall u \in [0; U]$
- (25) $dep_u \in \mathbb{R}^+$ $\forall u \in [0; U]$

Dans ce modèle, les contraintes 1 et 2 établissent la continuité des tâches d'une période

à la suivante; 3 et 4 déterminent les fenêtres de temps pour l'arrivée des tâches ; 5 et 6 déterminent les fenêtres de temps dans lesquelles les tâches doivent être finies : 7 établit un ordre dans les tâche de chaque machine ; 8 et 9 déterminent la quantité d'énergie à apporter à la tâche pour chaque machine ;10, 11 et 12 vérifient qu'en tout le temps l'énergie attribuée à chaque machine soit dans les limites acceptables ; 13 détermine la période d'apport d'énergie pour la tâche i , 14 est utilisée pour gérer la disponibilité des équipes de charge et de décharge et 16 calcule le total d'énergie consommé dans la période u .

Ce modèle caractérise le système de production de l'usine de Wolverine. Pourtant, à cause de sa grande complexité et de sa résolution difficile, il ne peut pas être utilisé dans un cas réel. En effet, l'usine, pour assurer son bon fonctionnement, doit avoir la capacité de prendre des décisions rapidement et de réagir face à circonstances inattendues, ce que n'est pas possible avec le modèle d'optimisation. C'est pourquoi il est nécessaire de trouver un autre outil qui permette d'obtenir des solutions de façon plus simple et plus rapidement.

Le type de solution dont l'usine a besoin n'est pas nécessairement la solution optimale. Des solutions approximatives mais rapides à trouver et faciles à implémenter sont plus utiles.

CHAPITRE 5: MODÈLE DE SIMULATION

Pour étudier le fonctionnement de l'usine sous l'application du concept de délestage mentionné antérieurement, ce projet propose un modèle de simulation qui inclut la fonderie et les deux presses du système productif de l'usine de Wolverine à Montréal.

5.1 Structure du modèle

La figure 5.1 montre le modèle global construit pour représenter le système productif de l'usine de Wolverine à Montréal avec le logiciel Taylor Ed. Le modèle est plus détaillé dans les annexes.

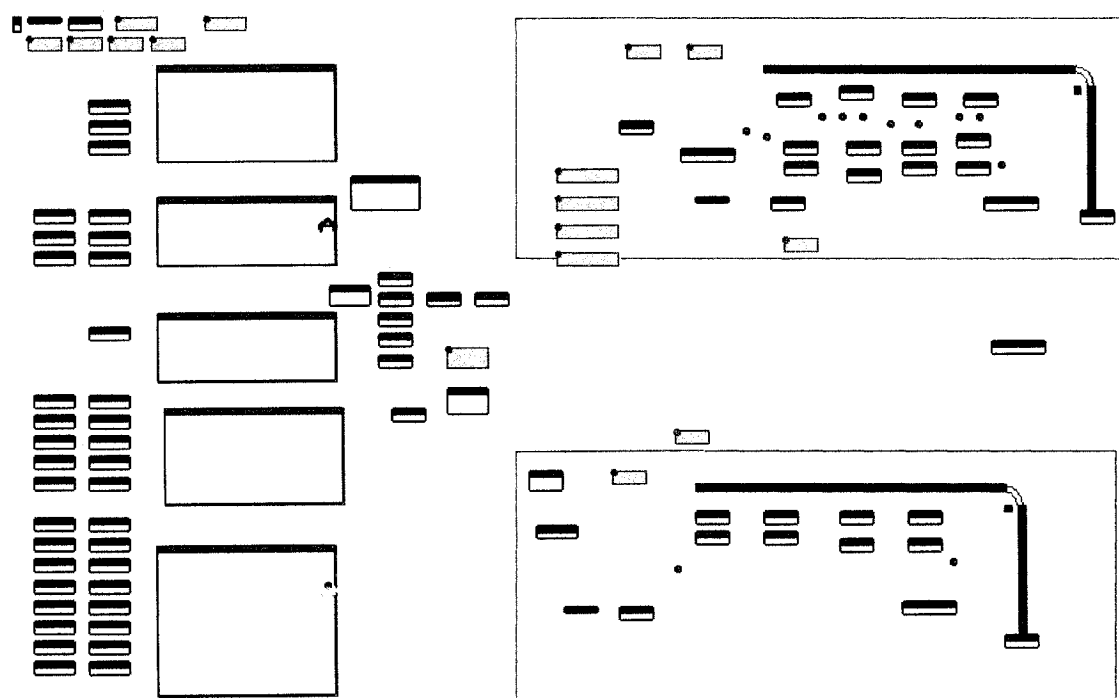


Figure 5.1 Modèle Global

Le Modèle de simulation utilisé est composé par 4 grandes parties: les lignes de fonte, le processus de découpage, les presses et un sous-modèle auxiliaire pour gérer le délestage.

5.1.1 Lignes de fonte

Dans la première partie du système, les matériaux primaires arrivent à la fonderie et sont traités par une des lignes de fonte selon le type de commande. À l'arrivée des entités, des attributs sont assignés. Ils spécifient: le type de produit (35 références différentes) et le diamètre et la presse qui devra les traiter. Dans chaque ligne, les temps de cycle de fonte et de coulée sont déterminés individuellement selon les caractéristiques du produit.

Chaque ligne a été modélisée de la façon suivante (figure 5.2): pour chaque type de produit une source a été assignée, les entités provenant de cette source sont envoyées vers une paire de serveurs qui servent à représenter le four. L'utilisation de 2 serveurs (dans la figure 5.2 : « serveur8 » et « fonte 2 ») pour modéliser le four a été une astuce pour faciliter la modélisation de la variabilité des temps de cycles des tâches, lesquels ne sont pas connus avec certitude au début de la tâche et dépendent des quantités d'énergie allouées aux machines. Ainsi à chaque période, l'entité ira d'un des serveurs à l'autre ajoutant dans une variable implicite l'avancement réalisé à cette période selon la quantité d'énergie dont la machine a disposé.

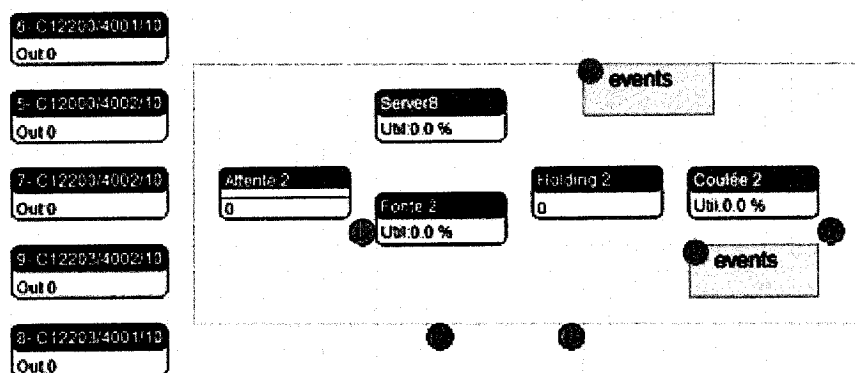


Figure 5.2: Modèle d'une ligne de fonte à la fonderie

Lorsque la fonte est finie, les entités passent au processus de coulée et ensuite sortent de la fonderie pour être coupées et envoyées vers la tréfilerie ou la tuberie selon les types d'entité.

Cinq sous-modèles de ce type composent la partie du modèle qui représente la fonderie.

5.1.2 Découpage

Une fois que le produit a complété son processus à la fonderie, il sera découpée en plusieurs pièces que après seront envoyés vers une des presse selon la référence du produit.

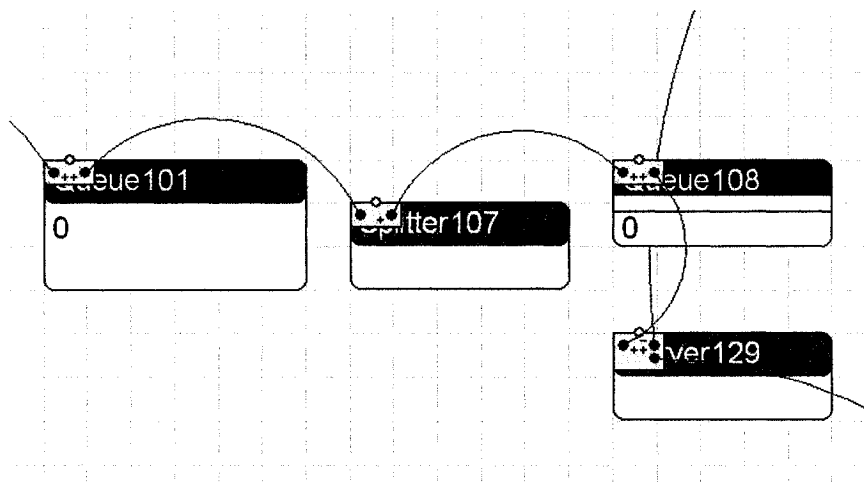


Figure 5.3 Modélisation de Découpage

5.1.3 Presses

Une fois que les billots sortent de la fonderie et le découpage a été fait, les morceaux sont envoyés vers une des presses selon le type de pièce. Les presses sont composées de 4 inducteurs en parallèle et d'une machine extrudeuse.

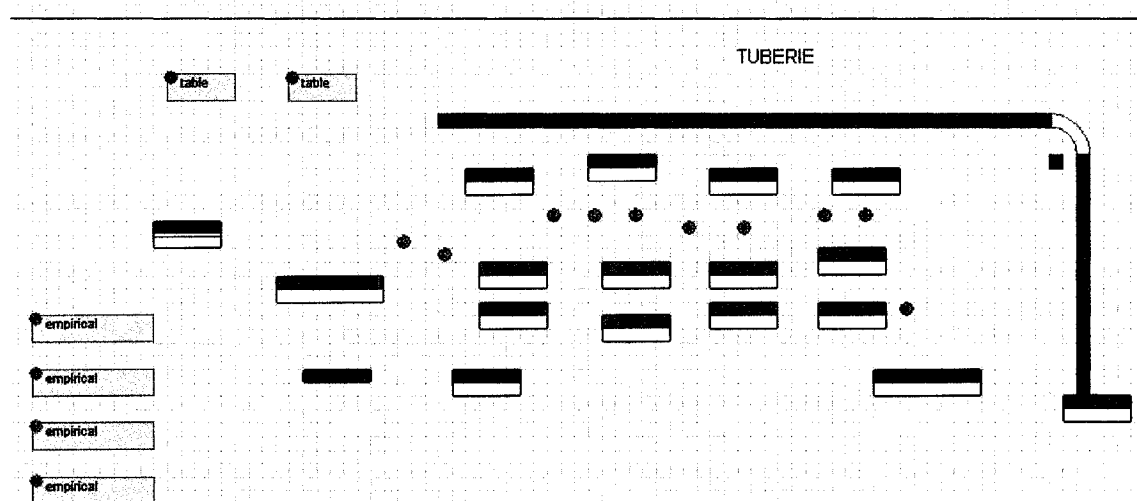


Figure 5.4: Modèle Presse Ronto

Chacun des sous modèles (tel qu'on le voit ci-dessus) représente une des presses de l'usine. L'un représente la presse Ronto et l'autre représente la presse Monty, chacune traitant un type différent de pièces.

5.1.4 Modélisation du délestage

Pour modéliser le processus de délestage, un sous modèle parallèle a été créé de telle façon qu'une entité soit créée à chaque 10 secondes. Lorsque cette entité arrive à un serveur auxiliaire, le serveur auxiliaire récolte l'information de chacune des machines du système et calcule la puissance totale qui est en train d'être utilisée dans le système. Avec ce calcul, les niveaux du délestage à faire seront calculés et l'allocation d'énergie aux machines sera faite selon la politique qui aura été choisie.

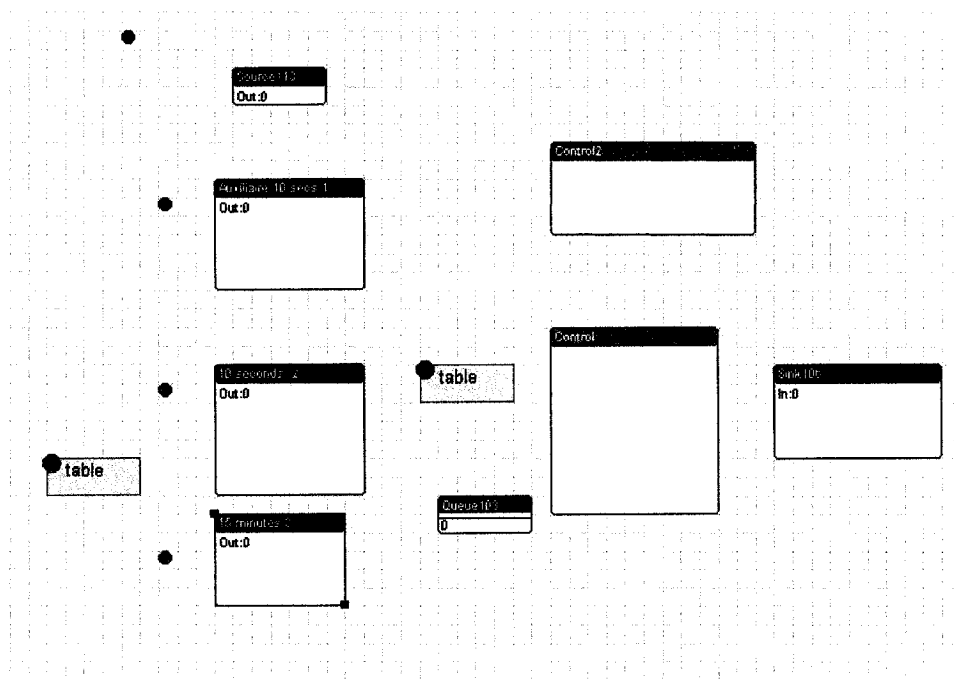


Figure 5.5 Modèle Auxiliaire pour contrôler le Processus de délestage

Formule du délestage

$$M_t = \frac{1 - \left(\frac{\sum_{i,j} \sum_0^t U_{aijt}}{E_t} \right) c_{a,i,j}}{1 - D} - O$$

M_t = proportion de puissance disponible à l'instant t par rapport à la puissance souscrite en conditions normales

U_{aijt} = consommation (kWh) de puissance de la machine 'j' du four 'a' traitant la tâche 'i' à l'instant 't'

E_t = l'énergie pouvant être consommée depuis le début de la période jusqu'à l'instant t (kWh)

D = Paramètre début, indiquant à quel moment le processus de délestage doit débuter. Lorsque le ratio (énergie consommée/ énergie disponible) s'approche de la valeur D le délestage est déclenché.

O = décalage permis pour éviter des changements brusques dans les valeurs de M_t

Soit aussi :

P_{jt} : la puissance accordée à la machine j en conditions normales à l'instant t

Q_{jt} : puissance accordée à la machine j une fois le processus du délestage déclenché à l'instant t

Plusieurs scénarios seront testés ainsi :

- Scénario 1 :

La puissance disponible est réduite proportionnellement aux 3 lignes, ainsi les puissances disponibles accordées aux machines seront les suivantes :

$$Q_{1t} = P_1 * M_t$$

$$Q_{2t} = P_2 * M_t$$

$$Q_{5t} = P_5 * M_t$$

- Scénario 2 :

La puissance disponible pour les fours est distribuée parmi les lignes en tenant compte d'une échelle de priorité selon les niveaux historiques d'utilisation de ces lignes. Ainsi une fois le total de puissance disponible calculé par la formule de délestage, la distribution aux lignes de fonte sera faite ainsi :

$$Q_{1t} = P_1 * M_t * 1.2$$

$$Q_{2t} = P_2 * M_t * 1.0$$

$$Q_{5t} = P_5 * M_t * 0.8$$

- Scénario 3 :

La puissance disponible pour les fours est distribuée parmi les lignes en tenant compte d'une échelle de priorité selon les temps des débuts des tâches. Priorité

donnée aux tâches les plus proches de leur fin. Ainsi une fois le total de puissance disponible calculé par la formule de délestage, la distribution aux lignes de fonte sera faite ainsi :

$$Q_{at} = P_1 * M_t * 1.2$$

$$Q_{bt} = P_2 * M_t * 1.0$$

$$Q_{ct} = P_5 * M_t * 0.8$$

Ou « a » représente la machine dont la tâche a débuté la première en comparaison avec les autres tâches dans les machines délestées de la fonderie, « b » la seconde et « c » la dernière.

- Scénario 4

La puissance disponible est réduite proportionnellement sur les 3 lignes, mais en plus un système essayant de prévoir la demande future est inclus. Ainsi à chaque fois la formule de délestage est calculée avec la somme des puissances actuelles et aussi avec un estimatif de la demande totale du système 1 minute dans le future.

Soit M_t le résultat obtenu avec la formule de délestage mentionnée antérieurement, et M'_t Le résultat de cette formule utilisant comme paramètre les pronostiques des demandes d'énergie futures à la place de les demandes actuelles; la puissance disponible accordée aux machines dans ce scénario sera la

suivante :

$$Q_{1t} = P_1 * \max(M_t, M'_t)$$

$$Q_{2t} = P_2 * \max(M_t, M'_t)$$

$$Q_{5t} = P_5 * \max(M_t, M'_t)$$

Une fois que la puissance totale utilisée retourne aux valeurs acceptables, le délestage se termine et les puissances disponibles pour les machines sont rétablies.

Il est important de noter que le délestage est fait aussi sur les inducteurs de la presse Monty, pourtant la formule utilisée pour calculer la puissance qui leur sera accordée sera la même dans tous les scénarios :

$$Q_{it} = P_i * M_t$$

5.1.5 Les temps de traitement

Les temps de traitement sur chaque machine sont fonction de la puissance appelée. Ainsi chaque temps de cycle sera calculé à partir d'une fonction de distribution multipliée par une fonction linéaire qui décrit la relation puissance temps de traitement ayant comme paramètre la puissance disponible (puissance utilisée).

Pendant le processus du délestage l'appel de puissance pour réaliser la tâche i à la machine j peut être réduit jusque la moitié de ce qui est considéré comme l'appel de puissance habituel, dans ce cas le temps du cycle se verra affecté :

Soit

E_{ij} : la quantité de puissance appelée en condition normale pour réaliser la tâche i à la machine j

T_{ij} : le temps de cycle d'une tâche i sur la machine j lorsque un appel de puissance sans délestage est fait

E_{ij}' : la quantité de puissance appelée pour réaliser la tâche i sur la machine j dans un situation particulière ou le processus de délestage a été déclenché

T_{ij}' : le nouveau temps de cycle de la tâche i sur la machine j dans une situation particulière ou le processus de délestage a été déclenché et un appel de puissance E_{ij}' Inférieur à E_{ij} est alloué la machine.

Alors la relation entre les quantités d'énergie disponibles pour les tâches et les temps de cycle est décrite par l'équation suivante :

$$T_{ij}' = (E_{ij}' / E_{ij}) * T_{ij}$$

La variation des appels de puissance pendant le délestage ne peut pas être supérieure au 50% de la valeur habituelle pour que la machine puisse rester en fonctionnement. Si, à un instant donné, un appel de puissance inférieur à 50% de E_{ij} la machine ne pourra pas réaliser la tâche.

Alors

$$E_{ij} > E_{ij}' > E_{ij}/2$$

doit être respecté en tout le temps par le processus de délestage.

Un autre aspect du processus de délestage à considérer c'est que pendant le temps où

une machine traite une tâche le temps de cycle ne se maintient pas constant. Comme on a déjà mentionné, le système est diagnostiqué à chaque période de 10 secondes. Dans chacun de ces diagnostics, les différents niveaux du délestage à faire sont calculés et appliqués au système. De cette manière, les appels de puissance alloués aux machines varient pendant que les tâches sont effectuées et en conséquence les temps de cycle initiaux varient aussi. À la fin, chaque machine qui est en train de traiter une tâche changera à chaque 10 secondes sa vitesse selon les niveaux de puissance que lui auront été accordés. En conséquence, chaque tâche prendra une durée de cycle inconnue au début du traitement de la tâche.

5.1.6 Les Indicateurs de performance

Les différents scénarios seront comparés selon différents critères. D'abord, le critère le plus important est que la demande soit satisfaite, ensuite il faut tenir compte :

- des niveaux de puissance utilisés : mesurés comme la quantité totale d'énergie utilisée pendant la période d'un mois (kWh);
- des volumes de production : mesurés comme la quantité (lb) totale de matériel traité par les fours pendant le mois;
- du coût total de l'énergie consommée : calculé selon les formules de facturation utilisées par Hydro-Québec;
- du coût par livre de matériel fondu (\$/lb): obtenu en divisant le coût total généré par la consommation énergétique pendant le mois et la production totale des fours.

5.2 Données de simulation de Tuyaux Wolverine

5.2.1 Consommation de puissance

- Les consommations énergétique de l'usine sont déterminées pour les 5 fours (ligne 1, ligne 2, ..., ligne 5) lesquels en conditions normales demandent des puissances de 2000kW, 2000 kW, 1600kW, 450kW et 2000kW respectivement et pour les presses. La presse Ronto comprend 4 inducteurs chacune desquels consomme demande une puissance de 1000kW. La presse Monty comprend 4 inducteurs, chacun de ces inducteurs demande une puissance de 750kw. Lorsqu'une machine est vide, elle consomme 150 kW.

5.2.2 Temps de cycle, intervalles d'arrivée

Des 5 fours, le délestage est fait seulement sur des lignes 1, 2 et 5.

Le temps de cycle des machines ainsi que les temps entre les arrivées sont des variables aléatoires qui suivent le comportement indiqué dans les tableaux suivants:

Le four 1 traite 3 types de billots.

Tableau 5.1 Temps de cycle du premier four

	Temps de traitement fonte (secs)	Temps de traitement Coulée (secs)	Intervalles d'arrivée (secs)
C11000/4001/8	Normal (4500, 200)	Normal(1800,100)	Negexp(83077)
C11000/4001/10	Normal (4500, 200)	Normal(2040, 100)	Negexp(26503)
C11000/4002/10	Normal (4500, 200)	Normal(2040, 100)	Negexp(288000)

Le Four 2 traite 5 types de billots.

Tableau 5.2 Temps de cycle du deuxième four

	Temps de traitement fonte (secs)	Temps de traitement / coulée (secs)	Intervalles d'arrivée (secs)
C12000/4001/10	normal(7200,200)	Normal(3480,100)	Negexp(254118)
C12000/4002/10	normal(7200,200)	Normal(2657,100)	Negexp(3085714)
C12200/4001/10	normal(7200,200)	Normal(3480,100)	Negexp(162406)
C12200/4002/10	normal(7200,200)	Normal(2657, 100)	Negexp(28346)
C12203/4001/10	normal(7200,200)	Normal(3480,100)	Negexp(21600000)
C12203/4002/10	normal(7200,200)	Normal(2657, 100)	Negexp(116757)

Le Four 3 traite 1 type de billots.

Tableau 5.3 Temps de cycle du troisième four

	Temps de traitement fonte (secs)	Temps de traitement / coulée (secs)	Intervalles d'arrivée (secs)
C12000/4001/10	normal(4500,200)	Normal(1200,100)	Negexp(40000)

Le Four 4 traite 10 types de billots.

Tableau 5.4 Temps de cycle du quatrième four

	Temps de traitement fonte (secs)	Temps de traitement coulée (secs)	Intervalles d'arrivée (secs)
C22000/4001/8	normal(10800,200)	Normal(1500,100)	Negexp(2400000)
C22000/4001/10	normal(10800,200)	Normal(1500,100)	Negexp(5400000)
C22000/4002/10	normal(10800,200)	Normal(1500,100))	Negexp(744828)
C23000/4001/8	normal(10800,200)	Normal(1500,100)	Negexp(21600000)
C23000/4001/10	normal(10800,200)	Normal(1500,100)	Negexp(21600000)
C23000/4002/10	normal(10800,200)	Normal(1500,100)	Negexp(45666)
C26000/4001/10	normal(10800,200)	Normal(1500,100)	Negexp(21600000)
C31400/4001/8	normal(10800,200)	Normal(1500,100)	Negexp(1440000)
C31400/4001/10	normal(10800,200)	Normal(1500,100)	Negexp(568421)
C36000/4001/10	normal(10800,200)	Normal(1500,100)	Negexp(21600000)

Le Four 5 traite 16 types des billots.

Tableau 5.5 Temps de cycle du cinquième four

	Temps de traitement fonte (secs)	Temps de traitement coulée (secs)	Intervalles d'arrivée (secs)
C70400/4002/10	Normal(5200,200)	Normal(2657,100)	Negexp(21600000)
C70600/4001/8	Normal(5200,200)	Normal(4200,100)	Negexp(553846)
C70600/4001/10	Normal(5200,200)	Normal(5400,100)	Negexp(2700000)
C70600/4002/10	Normal(5200,200)	Normal(2657,100)	Negexp(635294)
C70610/4001/10	Normal(5200,200)	Normal(5400,100)	Negexp(20339)
C70610/4002/10	Normal(5200,200)	Normal(2657,100)	Negexp(10800000)
C70612/4001/8	Normal(5200,200)	Normal(4200,100)	Negexp(280519)
C70612/4001/10	Normal(5200,200)	Normal(5400,100)	Negexp(4320000)
C70612/4002/10	Normal(5200,200)	Normal(2657,100)	Negexp(696774)
C706mn/4002/10	Normal(5200,200)	Normal(2657,100)	Negexp(248276)
C71000/4002/8	Normal(5200,200)	Normal(2657,100)	Negexp(5400000)
C71000/4002/9	Normal(5200,200)	Normal(2657,100)	Negexp(21600000)
C71500/4001/8	Normal(5200,200)	Normal(4200,100)	Negexp(4320000)
C71500/4002/8	Normal(5200,200)	Normal(2657,100)	Negexp(171429)
C71500/4002/9	Normal(5200,200)	Normal(2657,100)	Negexp(295890)
C71500/4001/10	Normal(5200,200)	Normal(5400,100)	Negexp(10800000)

5.2.3 Les employés

Il y a 3 quarts de travail de 8 heures, dans chaque quart de travail il y a 2 pauses de 15 minutes et une d'une demi-heure. Il y a 2 employés chargés de faire les coulées pour les 5 machines, donc seulement deux coulées peuvent être faites simultanément.

5.2.4 Presses

Les entités à traiter dans les presses sont classifiées parmi 4 types selon la référence de la pièce. Les temps de cycle des machines suivent un comportement aléatoire variable lequel varie selon le type de pièce qui est en train d'être traité ainsi :

- type 1 (C1XXX) : Normal(195, 20)

- type 2 (C2XXX): Normal(310,75)
- type 3 (C70XX): Normal(520,75)
- type 4 (C71XX): Normal(480,30)

5.2.5 Extrusion

Une fois la presse a complété le traitement d'une pièce, celle ci ira a la machine extrudeuse où les temps de processus dépendent aussi du type de la pièce en question :

- type 1 (C1XXX) : 1 min 25 sec / billette;
- type 2 (C2XXX): 2 min / billette;
- type 3 (C70XX): 2 min 25 sec / billette;
- type 4 (C71XX): 2 min / billette.

5.2.6 Tarification:

Le tarif mensuel est donné par :

$$E_C = f_1 P + f_2 E + P_D$$

$$P_D = (P' - 1.1 \cdot P) \cdot f_3 \quad \text{si } P' \geq 1.1 \cdot P$$

Ou f_1 est le tarif mensuel d'abonnement (10,95\$/ kW), P la puissance demandée (kW), f_2 le tarif de consommation (0,0242\$/ kWh), E la puissance consommée (kWh) et P_D la pénalité de dépassement, qui atteint 6.37\$ pour chaque kW dépassant 110% de la puissance demandée.

5.2.7 Formule du délestage

Chaque période de 15 minutes comprend 90 intervalles de 10 seconds. À chaque intervalle, le calcul de la puissance(K_i) appelée dans la période (pulses) est comparé avec une valeur Compte Max(K_{max}) qui sert de guide pendant la période pour ne pas dépasser le total de puissance souscrite.

Tableau 5.6 Puissance cumulée permise à chaque échantillon de 10 secondes (puissance souscrite = 10700 kWh)

Numéro échantillon	Période sec	COMPTE MAX. (K_{max})
1	10	8
2	20	17
3	30	25
4	40	33
...
88	880	727
89	890	735

À chaque intervalle de 10 secondes, les calculs suivants sont faits :

$$\% \max = \frac{K_i}{K_{\max}}$$

$$\% \text{Sortie} = \left(\frac{100\% - \% \max}{100\% - \% \text{Debut}} \right) - \% \text{Offset}$$

Le résultat %Sortie détermine la quantité de puissance qui sera disponible pour les machines où le délestage est fait. Par exemple, si d'habitude la machine A fait des appels

de puissance de 2000 KW et que le résultat du délestage à un instant donné est de 85%, alors cette machine pourra appeler seulement 1700 kW dans cet intervalle. En conséquence, son temps de cycle se verra affecté et sera maintenant égal au temps de cycle habituel divisé par 85%.

Le temps de cycle d'une machine faisant partie du délestage est affecté ainsi:

$$TC'_i = \frac{TC_i}{\%Sortie}$$

TC étant le temps de cycle habituel de la machine i et %sortie la valeur calculée dans la formule précédente.

Le délestage peut être fait jusqu'à 50%. Si le résultat de la formule donne une valeur inférieure, une valeur de 50% sera utilisée à sa place.

5.3 Construction des scénarios

Deux classes de modèle ont été construites et dans chaque classe 24 scénarios différents ont été évalués.

Dans la première classe, on ignore la consommation fixe d'énergie provenant d'éléments qui ne font pas partie du système productif. Ainsi, la consommation totale de l'usine considérée dans les scénarios de cette classe provient exclusivement des lignes de production.

Dans la deuxième classe, on a ajouté à l'ensemble des consommations de l'usine une consommation fixe de 2000 kWh qui ne provient pas de l'ensemble de machines du

système productif mais qui est présente constamment (éclairage, chauffage...) et a un impact important dans le calcul des coûts.

Dans chacune de ces classes, 24 scénarios différents ont été construits en modifiant trois paramètres du système. Les scénarios ont été obtenus en combinant les différentes valeurs avec lesquels ces paramètres ont été testés.

Ces paramètres sont les suivants:

Puissance souscrite: la puissance totale maximale qui peut être appelée par l'ensemble des machines de l'usine sans être pénalisée.

Deux valeurs ont été testées: 10700 et 9500.

Paramètre % Début : ce paramètre détermine le moment où le processus du délestage est déclenché. Celui-ci commence lorsque la puissance appelée en relation avec la puissance souscrite dépasse le % Début sélectionné à chaque intervalle de 15 minutes.

Trois valeurs ont été évaluées : 85%, 90% et 95%.

Politique de délestage : on peut réaliser le délestage de diverses façons, dans ce projet on a considéré les quatre politiques suivantes:

- Politique 1: assigner à chacune des machines délestées la même quantité d'énergie
- Politique 2 : donner priorité à la machine qui habituellement est la plus chargée
- Politique 3 : lorsque le délestage est déclenché, donner priorité à la machine dont la tâche la plus ancienne dans le système.

- Politique 4 : égal à la politique 1 sauf qu'ici, on essaiera de prévoir l'état des machines deux minutes dans le futur avant de décider de déclencher le délestage. La façon dont cette prévision de l'état futur de la demande du système est faite ainsi :

À chaque période l'état de chaque machine et des tâches dans le système sont observés. Si à une tâche, il reste moins d'une minute pour la compléter on considèrera pour faire le pronostic que dans 1 minute la machine sera libre et qu'en conséquence sa demande d'énergie en ce moment sera minimale (lorsque un four est libre, sa consommation est de 200kW). Pour le reste des tâches, celles auxquelles il reste plus d'une minute pour être complétées, le pronostic de la demande future se réalisera en assumant que sa demande après une minute sera la même par rapport à la demande énergétique actuelle.

Lorsque le pronostic de la demande future est fait, le calcul du niveau de délestage est calculé 2 fois : la première avec la demande énergétique actuelle, et la deuxième avec le pronostic de la demande future. Le niveau délestage choisi sera le minimum des deux.

Ainsi 24 différents scénarios ont été considérés et testés dans chaque classe, soit au total 48. Il faut noter que les scénarios de la première classe ne sont pas comparables avec ceux de la deuxième classe car ils représentent des conditions très différentes (2000 kWh fixes de plus).

Chaque exécution de ces scénarios simule le fonctionnement du système sous différentes configurations pendant une durée d'un mois.

Pour comparer les différents scénarios, les résultats qui ont été utilisés comme

indicateurs de performance furent la consommation totale d'énergie(kwh), le coût selon la formule de facturation(\$), le volume de matériel fondu en livres(lb), et un coût par livre fondue(\$/lb). Chaque scénario a été exécuté 12 fois et les moyennes de ces indicateurs ont été calculés dans les tables de résultats à l'annexe 1 (scénarios classe 1) et a l'annexe 2.

5.4 Plan d'expériences

L'arbre de la Figure 5.6 décrit la construction des 48 scénarios pour le plan d'expériences complet.

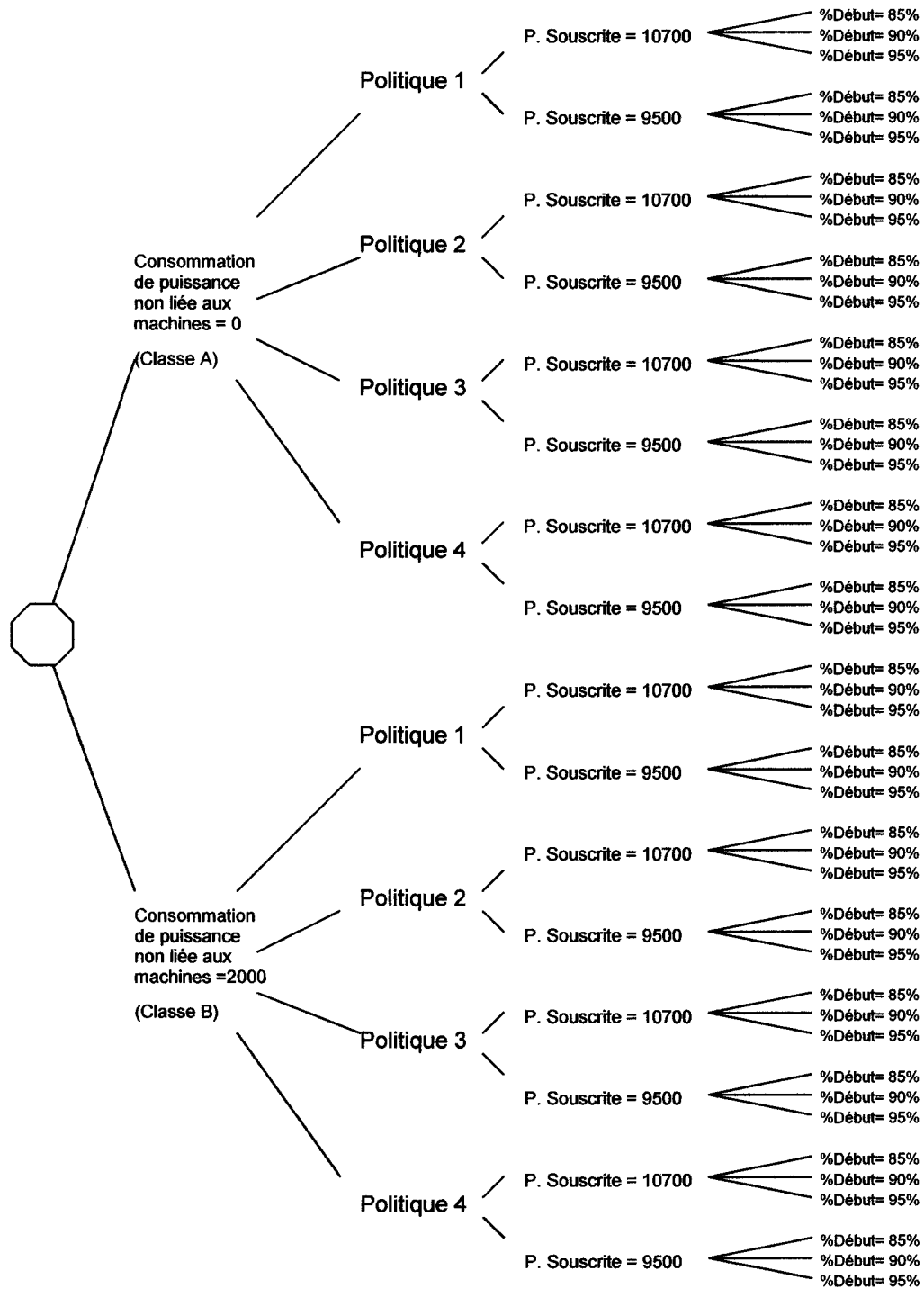


Figure 5.6 Construction de scénarios pour le plan d'expériences

Visant à avoir un plan d'expériences maniable, nous avons considéré seulement deux valeurs possibles pour le paramètre « Puissance Souscrite » et trois pour le paramètre « % Début ». Dans le cas de la puissance souscrite, les valeurs utilisées ont été 10700 kW et 9500kW. La première de ces valeurs est la puissance souscrite réelle de l'usine actuellement tandis que la dernière est une valeur que l'usine a considéré comme une alternative pour diminuer les coûts énergétiques. Les valeurs choisies pour le paramètre %Début ont été 85%, 90% et 95% Ces valeurs ont été sélectionnées visant à couvrir un rang assez grand pour déterminer l'impact de ce paramètre sur la performance du système.

Le tableau suivant résume le plan d'expériences. Chaque scénario a été testé 12 fois, la durée de chaque simulation dépend de la politique de délestage étudiée. Ainsi, la simulation de la politique 4 prend plus de temps que la simulation du reste des politiques. (Un tableau plus détaillé peut être trouvé dans les annexes)

Tableau 5.7 Puissance cumulée permise à chaque échantillon de 10 secondes

Politique /Classe	Nombre de Scénarios	Nombre de Tests/ Scénarios	Durée / test
1/A	6	12	7m 10 s
1/B	6	12	7m 10 s
2/A	6	12	8m 30 s
2/B	6	12	8m 30 s
3/A	6	12	8m 50 s
3/B	6	12	8m 50 s
4/A	6	12	9m 25 s
4/B	6	12	9m 25 s

5.5 Scénarios Additionnels

Considérant que dans le plan d'expériences montré précédemment, on a utilisé

seulement 2 valeurs possibles pour le paramètre « Puissance Souscrite » et 3 pour le paramètre « %Début », on a décidé de construire des scénarios additionnels pour observer le comportement du système sujet exclusivement à des modifications sur chacun de ces paramètres. Ainsi, les scénarios suivants ont été construits utilisant la politique de délestage 1 et une consommation énergétique non liée aux machines égales à 0 :

- Ayant la Puissance Souscrite = 10700, six scénarios ont été testés en donnant au paramètre %Début les valeurs: 85%, 87.5%, 90%, 92.5%, 95%, 97.5%
- Ayant le paramètre %Début = 95%, six scénarios ont été testés en donnant au paramètre Puissance Souscrite les valeurs: 9100kW, 9500kW, 9900kW, 10300kW, 10700kW, 11100kW

CHAPITRE 6: RÉSULTATS

Les résultats obtenus peuvent être appréciés dans les tableaux et figures suivants. Seulement les tableaux les plus significatifs seront inclus dans l'analyse des résultats; l'ensemble des résultats se trouve en annexe.

6.1 Résultats des scénarios de la classe 1

Nous avons d'abord voulu examiner quel serait l'impact des politiques de délestage sur la consommation énergétique totale de l'usine. Pour observer cet impact, nous pouvons comparer les résultats obtenus dans les scénarios ayant la même valeur pour le paramètre "puissance souscrite" et les mêmes valeurs pour le paramètre % début. Dans la figure 6.1, cette comparaison est faite en laissant la puissance souscrite constante à 10700 kW. Les valeurs sur l'axe X représentent les politiques telles que numérotées précédemment. Dans la figure 6.1 sont représentés trois scénarios de chaque politique correspondant aux trois valeurs différentes du paramètre début.

6.1.1 Consommation totale obtenue en modifiant la politique de délestage et le paramètre %début, puissance souscrite =10700kw

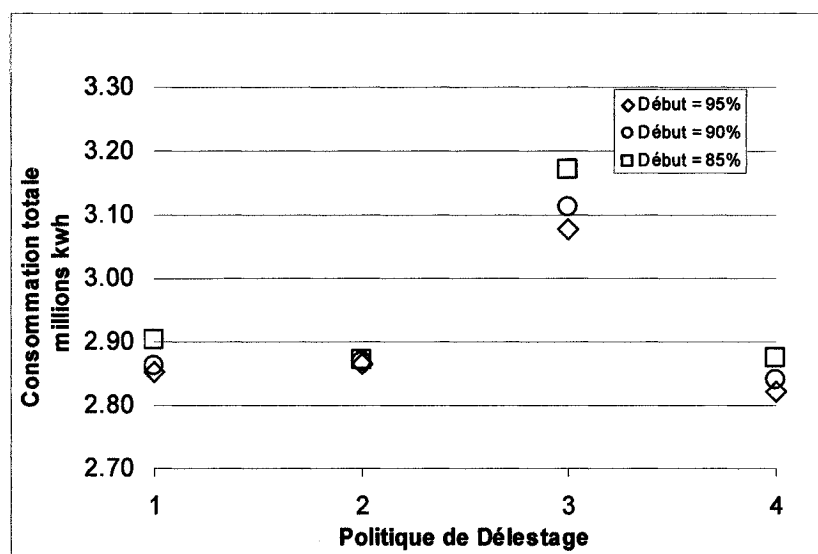


Figure 6.1: Consommation énergétique Vs Politique du délestage

La figure 6.1 montre que la politique numéro 3 (prioriser la distribution d'énergie aux machines où la tâche a commencé la première) consomme le plus d'énergie, tandis que le reste semble se maintenir à des niveaux de consommation similaires. La politique numéro 4 (faire le délestage de façon uniforme parmi tous les fours et aussi introduire un système pour prévoir les demandes futures) est celle qui présente le niveau de consommation le plus faible.

Il est aussi intéressant de noter que les scénarios où le paramètre début est inférieur sont ceux qui consomment le plus d'énergie.

Nous pouvons étudier le même aspect (l'impact du paramètre début et du politique délestage sur la consommation totale) en construisant le graphique correspondant aux

scénarios qui ont comme puissance souscrite 9500 kW. Le résultat obtenu est très similaire (Figure 6.2).

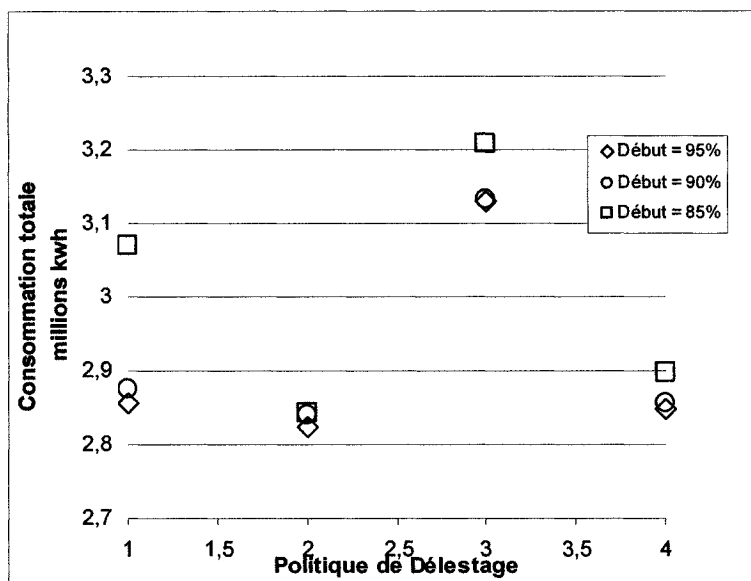


Figure 6.2: Consommation énergétique Vs Politique du délestage

Dans ce cas, la consommation la plus élevée est aussi obtenue avec la troisième politique tandis que le reste des politiques obtient des résultats très similaires. Une fois de plus, nous pouvons nous apercevoir que les scénarios avec une valeur début inférieure ont aussi une tendance à avoir des consommations plus élevées que le reste des scénarios.

6.1.2 Volume de fonte

Ensuite nous procédons à l'étude de l'impact de la politique du délestage sur les niveaux de production (mesurées comme la quantité de fonte réalisée).

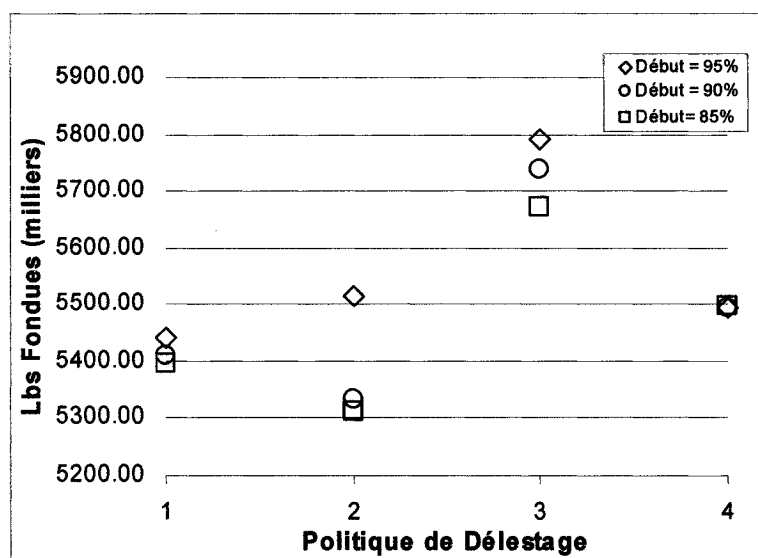


Figure 6.3: Production des fours vs Politique du délestage

La figure 6.3 montre que la politique numéro 3 obtient les plus hauts niveaux de production avec une marge considérable sur les autres. D'autre part, entre les 3 politiques restantes, c'est le numéro 4 qui est préférable par rapport à ce critère. Ces tendances sont confirmées en regardant le graphique et en faisant la même analyse en utilisant 9500 kW comme la valeur de la puissance souscrite (Figure 6.4).

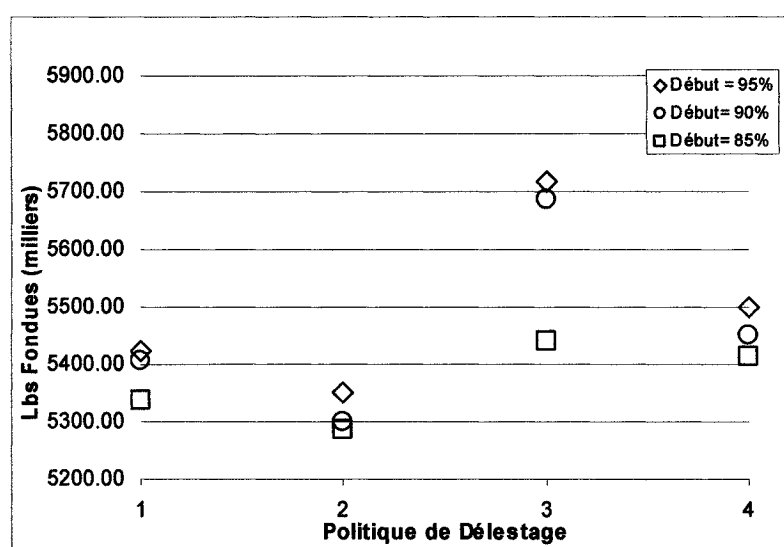


Figure 6.4: Production des fours Vs Politique du délestage

6.1.3 Coût total généré par la consommation énergétique :

La comparaison des politiques par rapport au coût énergétique calculé en utilisant la formule d'Hydro-Québec nous donne le suivant résultat :

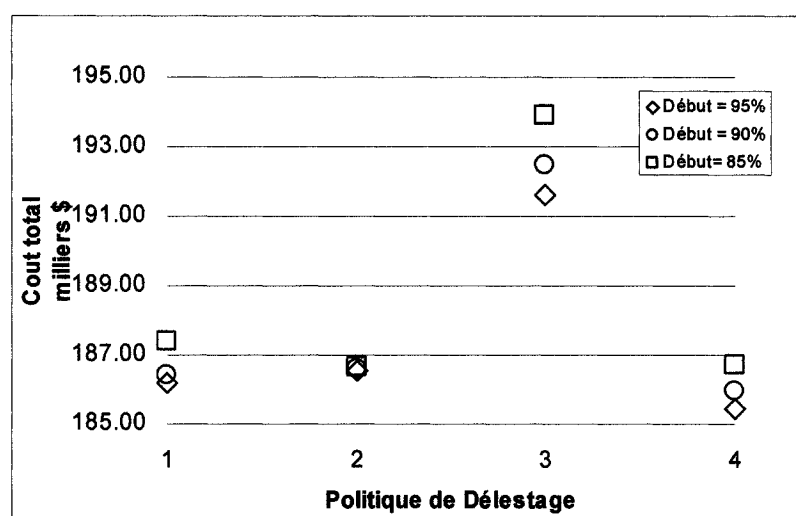


Figure 6.5: Coût total Vs Politique du délestage

En termes de coût, la politique numéro 4 semble être préférable tandis que la politique

numéro 3 apparaît comme la plus chère, ce qui a du sens car nous c'est la politique qui utilise le plus d'énergie.

Le graphique pour les scénarios ayant 9500 kW comme puissance souscrite nous donne des résultats similaires, sauf que dans ce cas, la politique numéro 2 donne un coût inférieur (Figure 6.5).

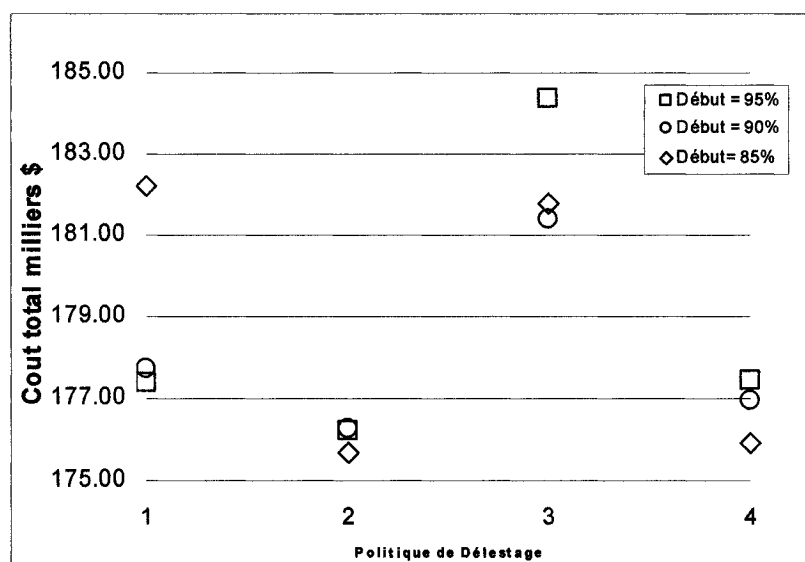


Figure 6.6: Coût total Vs politique du délestage

6.1.4 Coût / lb fondues

Finalement, le coût par livre fondue a été calculé en divisant le coût total de la consommation énergétique par la quantité de fonte réalisée. Le résultat obtenu suggère que la politique 3 est la meilleure car elle génère un coût unitaire par livre inférieur tandis que la politique numéro 2 se montre la moins efficace.

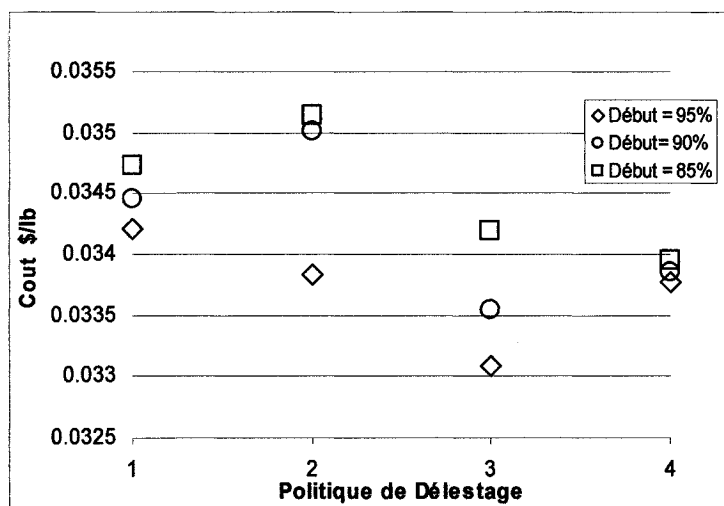


Figure 6.7: Coût par livre vs Politique du délestage

Il est intéressant noter que la politique numéro 4 donne des meilleurs résultats que la politique 1, ce qui permet de penser que la stratégie d'essayer de prévoir la demande future est supérieure sur ce critère.

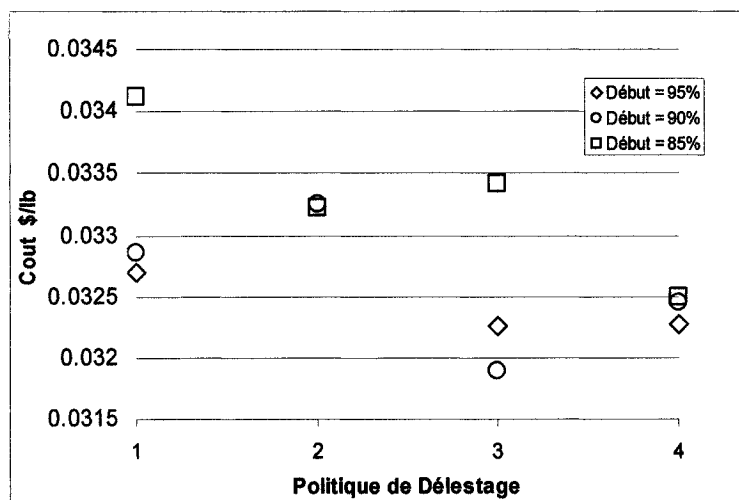


Figure 6.8: Coût par livre Vs Politique du délestage

6.2 Résultats des Scénarios de la classe 2

Ensuite, une variation du modèle original a été considérée (scénarios de la classe 2). Dans cette variante, il existe une consommation d'énergie additionnelle occasionnée par des sources qui ne font pas partie directement du processus productif mais qui sont indispensables pour le bon fonctionnement de l'usine. Ces sources génèrent une consommation fixe qui doit être ajoutée au modèle original pour avoir des résultats plus proches de la réalité.

Ainsi, dans le modèle précédent, une consommation fixe de 2000 kW a été ajoutée et les 24 scénarios mentionnés auparavant ont été simulés à nouveau. Les résultats obtenus ont été les suivants.

6.2.1 Consommation totale

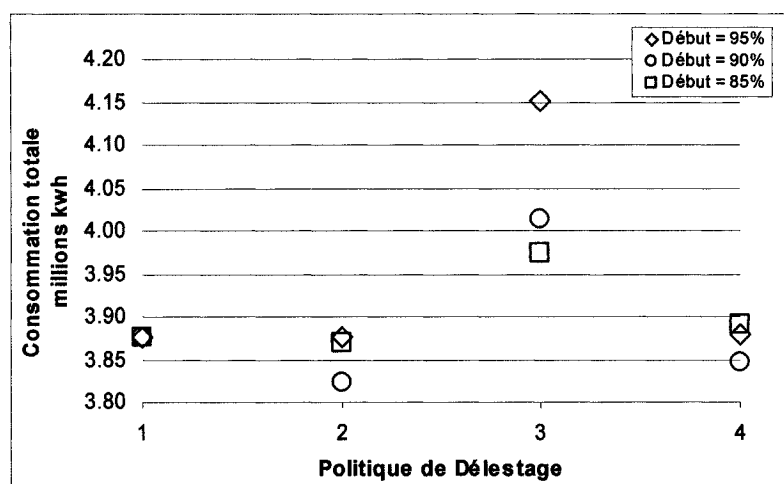


Figure 6.9: Consommation énergétique Vs Politique du délestage

En laissant constant le paramètre Puissance Souscrite et en comparant les

consommations d'énergie obtenues avec les différentes politiques, nous pouvons conclure que la politique numéro 3 est celle qui consomme le plus tandis que les politiques numéros 2 et 4 restent celles qui économisent le plus l'énergie.

Il existe une différence notable entre ces résultats et ceux obtenus avec les modèles de la classe 1 (sans consommation d'énergie fixe). Nous avons constaté dans ceux-ci (scénarios classe 1) que lorsque nous utilisons un paramètre %Début petit, les consommations d'énergie totales étaient supérieures à ceux où ce même paramètre était plus grand. Pourtant, dans ces nouveaux scénarios, dans lesquels nous avons ajouté des consommations d'énergie fixe (2000 kW), cette tendance ne se maintient pas ce qui montre que l'inclusion de cette consommation fixe joue un rôle important sur le profil de la demande énergétique du système.

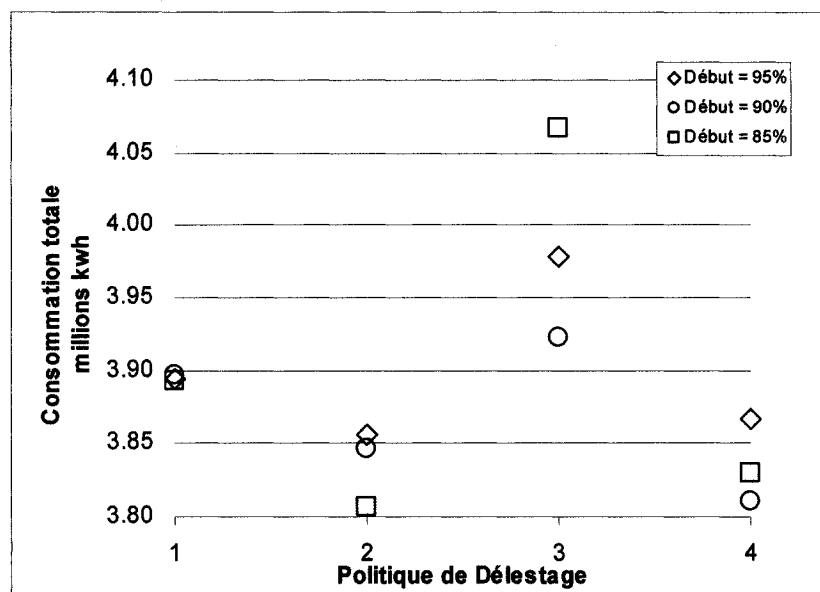


Figure 6.10: Consommation énergétique Vs Politique du délestage

6.2.2 Volume Traité (Lb Fondues)

En évaluant l'indicateur Volume traité, nous remarquons que la politique numéro 3 est la plus productive, suivi par les politiques 1 et 4.

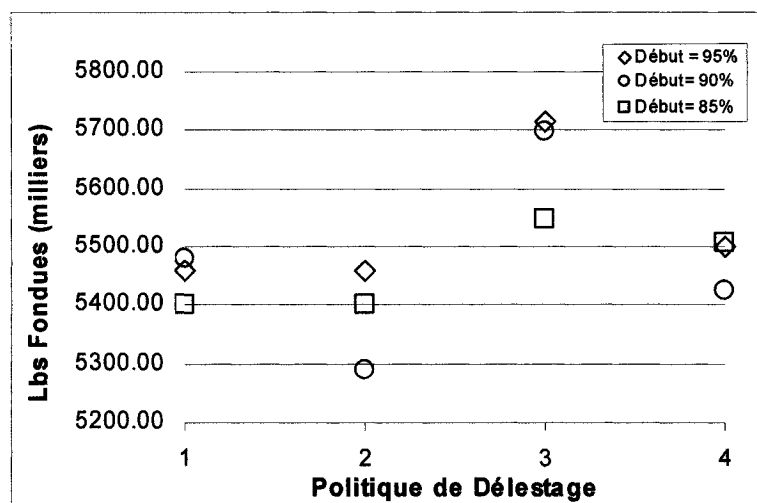


Figure 6.11: Production des fours : Consommation énergétique Vs Politique du délestage

Il faut se rappeler que pour les scénarios de la classe 1, nous avons obtenu un résultat similaire. Cette tendance peut être appréciée tant pour le cas où le paramètre Puissance souscrite est constant à 10 700 kW que dans celui où 9500 kW est utilisé comme puissance disponible.

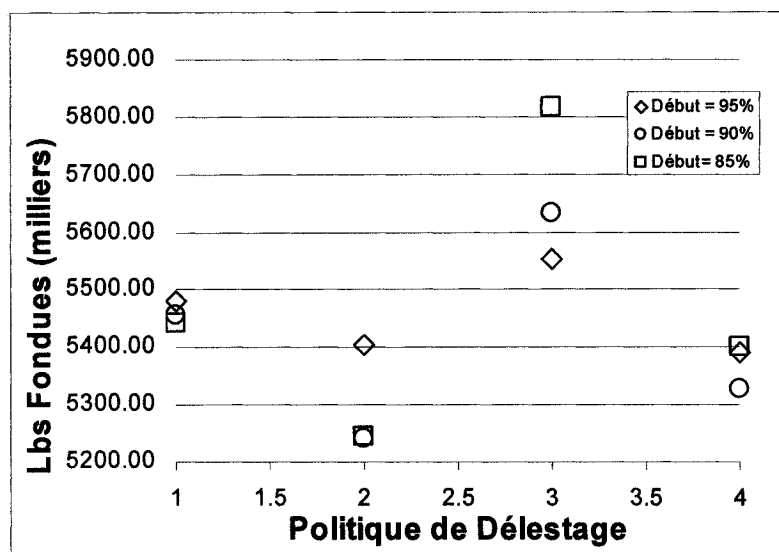


Figure 6.12: Production des fours : Consommation énergétique Vs Politique du délestage

6.2.3 Coût Total

Dans la Comparaison des coûts énergétiques totaux lorsque la puissance souscrite est 10700 kW, la politique 3 apparaît encore une fois comme la plus chère tandis que les 3 restantes maintiennent des coûts similaires.

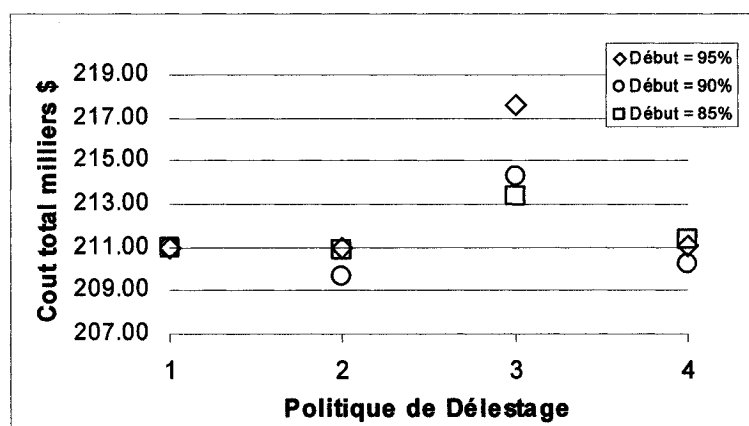


Figure 6.13: Coût Total Vs Politique du délestage

Par contre, lorsque nous laissons la puissance souscrite constante à 9500 kW, la

différence des coûts entre les politiques est moins marquée. Les politiques numéros 1 et 3 ont un coût légèrement supérieur aux autres.

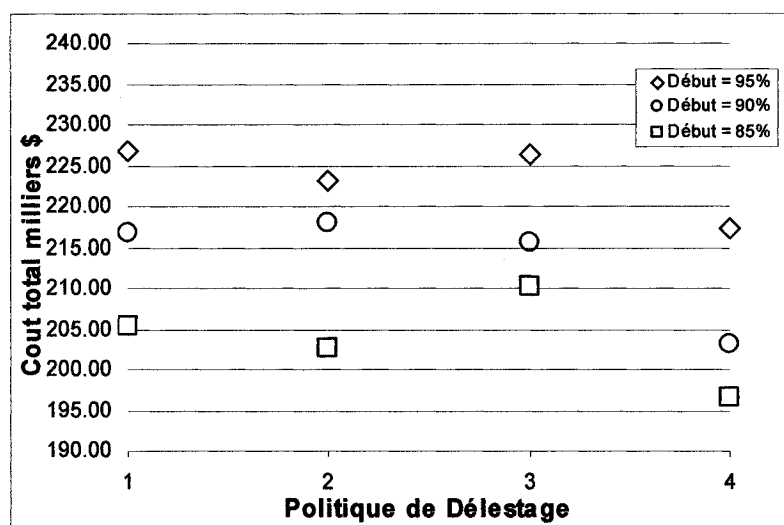


Figure 6.14: Coût Total Vs Politique du délestage

6.2.4 Coût par livre fondue

Finalement, en comparant les coûts de production par livre, nous pouvons constater que la politique numéro 3 permet obtenir des productions marginalement moins chères que le reste des politiques. Nous pouvons aussi observer que le politique numéro 4 présente de meilleurs résultats que la numéro 1 ce qui permet de conclure que les efforts pour prévoir la demande future permettent une amélioration sur le fonctionnement du système.

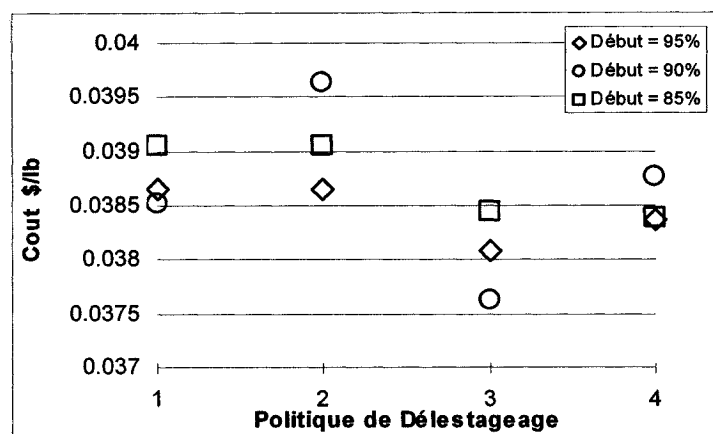


Figure 6.15: Coût par livre vs Politique du délestage

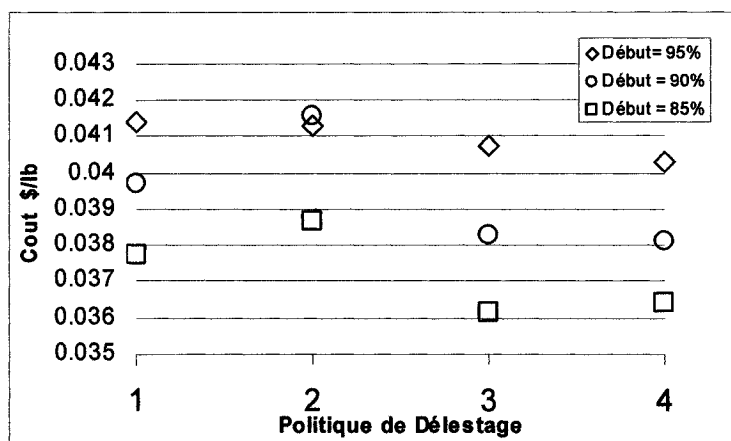


Figure 6.16: Coût par livre Vs Politique du délestage

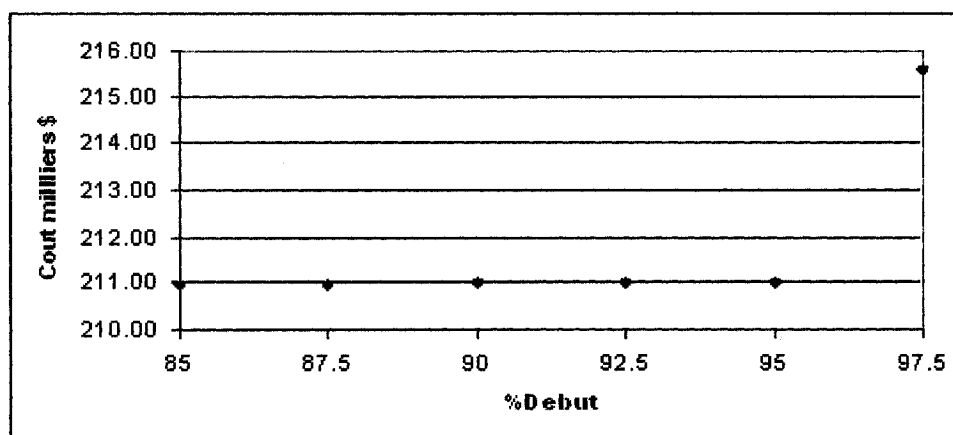
6.3 Impact du paramètre % début sur le système

Pour observer l'impact du paramètre %début sur le système, d'autres scénarios ont été créés et testés. Pour cela, nous avons gardé la politique actuelle de délestage (donner autant d'énergie à toutes les machines) et nous avons laissé la puissance souscrite constante à 10700 kW. Six scénarios ont été évalués en donnant des valeurs différentes aux paramètres début. Les résultats obtenus ont été les suivants.

Tableau 6.1 Résultats du système actuel en variant le paramètre %début

Paramètre %Début	Total consommation (kWh)	Coût(\$)	Prod. Fours (lb)	Coût par unité (\$/lb)
85	3875800	211000	5401800	3.91E-02
87.5	3876800	211000	5405200	3.90E-02
90	3877700	211000	5478600	3.85E-02
92.5	3878400	211000	5464900	3.86E-02
95	3877700	211000	5458200	3.87E-02
97.5	3877100	215600	5485300	3.93E-02

D'abord il est intéressant de noter que le coût total se maintient presque constant quand le paramètre %début a une valeur entre 85 % et 95%. Ce coût augmente considérablement lorsque le paramètre début est fixé à une valeur plus haute. On peut déduire que ces coûts additionnels dans le dernier scénario sont occasionnés lorsque la consommation totale de l'usine dépasse la limite de 10700 kW accordée comme puissance souscrite. Des pénalités sont alors imposées et la production devient plus coûteuse.

**Figure 6.17: Coûts énergétiques pour la politique actuelle en modifiant le paramètre % début**

Quant à la production, la tendance montre des résultats similaires quand le paramètre % début se trouve entre 90% et 95%. Pour les scénarios dont le %début est à une valeur inférieure à 90% le résultat est très inférieur tandis qu'à partir de 95 %, il semble y avoir une tendance aux niveaux de production plus hauts.

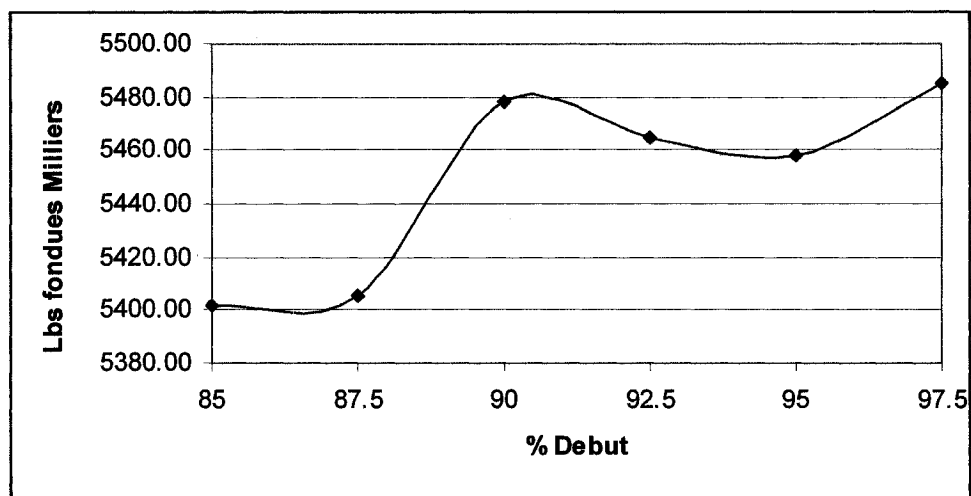


Figure 6.18: Livres fondus avec la politique actuelle avec plusieurs valeurs pour le paramètre % début

Finalement, en évaluant les coûts par unité fondue, il est juste d'affirmer qu'avec les valeurs testées, les résultats les plus efficaces sont obtenus lorsque le début est fixé à 90%. Dans le cas où le % début est fixé à une valeur inférieure, la production diminue tandis que pour les cas où le %début est trop grand nous risquons d'être pénalisés pour avoir dépassé le niveau de puissance souscrite

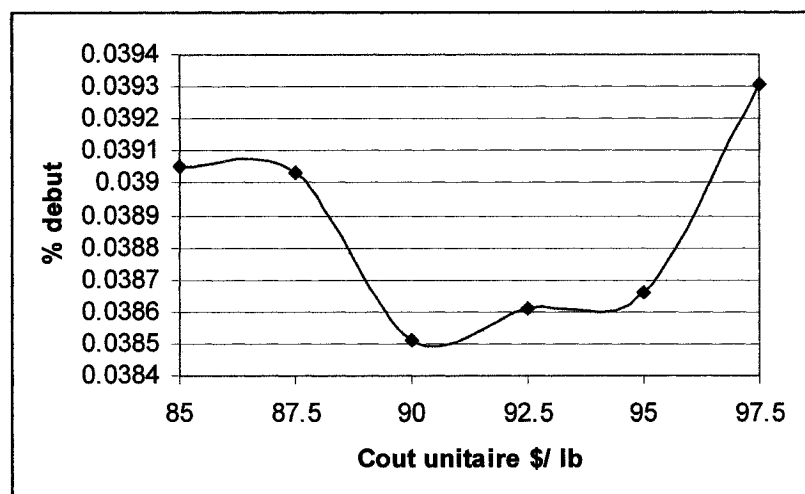


Figure 6.19: Coût par lb avec la politique actuelle en utilisant plusieurs valeurs pour le paramètre % début

6.4 Impact de la puissance souscrite sur le système

De la même façon, nous avons voulu établir la relation entre les niveaux de puissance souscrite et la performance de l'usine. Pour ce faire, d'autres scénarios ont été testés, cette fois en laissant constant le paramètre début à 90% et en utilisant le modèle de la politique numéro 1, celui qui est présentement utilisé à l'usine.

Les résultats obtenus ont été les suivants.

Tableau 6.2 Résultats du système actuel en variant le paramètre Puissance souscrite

Puissance souscrite (kW)	Consommation totale (kWh)	Coût(\$)	Prod. Fours (Lb)	Coût par unité (\$/lb)
9100	3890900	225000	5498300	4.09 E-02
9500	3897000	216800	5456800	3.97 E-02
9900	3884900	207800	5459800	3.80 E-02
10300	3878600	206600	5477786	3.77 E-02
10700	3877700	211000	5478625	3.85 E-02
11100	3877100	215400	5478790	3.93 E-02

Graphiquement, il est possible voir que les coûts les plus faibles sont obtenus avec des valeurs de la puissance souscrite entre 9900 et 10300 kW. Si nous utilisons une valeur inférieure à cet intervalle, nous risquons de dépasser les engagements en puissance et nous allons devoir payer des pénalités. Par contre, si la puissance souscrite est trop élevée, le coût de cette puissance sera trop élevé pour les besoins réels de l'usine.

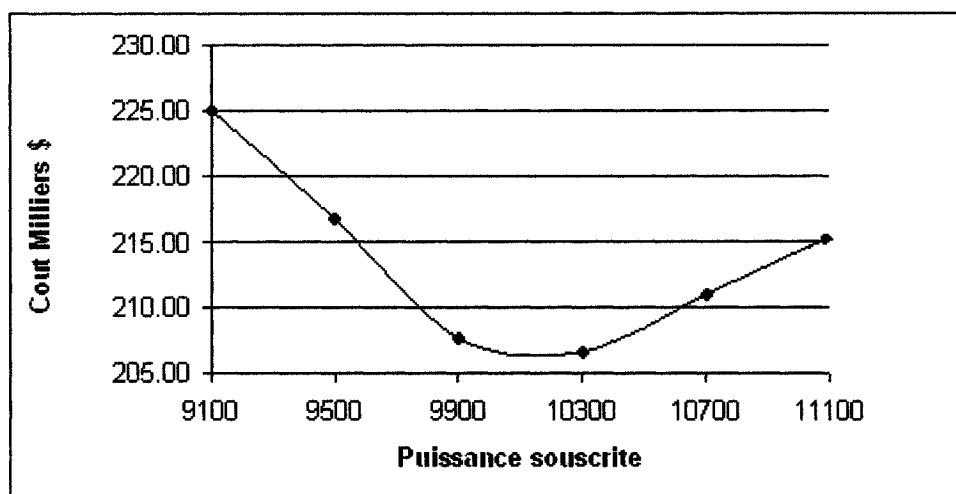


Figure 6.20: Coûts énergétiques pour la politique actuelle en modifiant la puissance souscrite

Ceci peut être observé aussi lorsque nous comparons les coûts par livre obtenus avec les différentes valeurs de puissance souscrite dans le graphique 6.21.

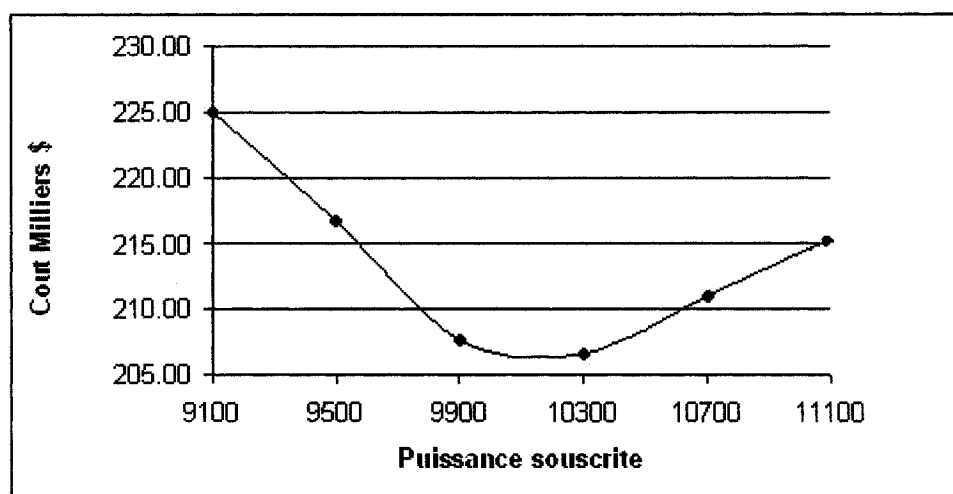


Figure 6.21: Coût par lb Vs Paramètre % Début

CHAPITRE 7: CONCLUSION

La gestion énergétique est devenue un aspect très important dans la planification des opérations des entreprises, à cause des tendances mondiales à donner de plus en plus importance aux considérations environnementales dans la production et à une conscientisation sur l'importance de mieux utiliser les ressources. Il a été nécessaire de repenser plusieurs méthodes et stratégies productives.

Un des aspects qui a été considéré comme un des plus importants à améliorer est celui de la consommation énergétique. Dans le passé les entreprises se permettaient de gaspiller de l'énergie en processus non nécessaires avec des méthodes peu efficaces. Aujourd'hui, cela n'est plus permis et les entreprises cherchent constamment des mécanismes pour être les plus efficaces possibles et pour produire autant que possible en minimisant la consommation énergétique.

Une de ces méthodes pour réduire les coûts liés à la consommation énergétique est le délestage. Il permet de réduire le niveau de pointe (facteur important dans le calcul de ces coûts) ; actuellement l'usine de Tuyaux Wolverine à Montréal possède une stratégie de délestage qui lui permet de réduire ses coûts de production considérablement. Pourtant, cette stratégie peut être encore améliorée en trouvant des politiques meilleures pour faire ce délestage.

Actuellement le délestage est fait de façon uniforme sur toutes les machines des 3 lignes de production de l'usine; il a été intéressant de tester d'autres politiques. Nous avons

trouvé qu'en utilisant une politique dans laquelle on priorise les machines sur lesquelles les tâches ont débutées les premières, il est possible d'obtenir des niveaux de productivité supérieurs avec un coût par livre inférieur. Nous avons aussi déterminé des intervalles pour les paramètres du processus de délestage qui permettent d'atteindre des résultats plus efficaces quant à la consommation énergétique.

Il est très intéressant de noter aussi que l'implantation d'un système de prévision de la demande future permet d'atteindre un système de production plus efficace mais demande un contrôle supérieur sur le processus du délestage par rapport à la production.

La principale contribution de ce mémoire réside dans la comparaison des méthodes de délestage. Ces travaux ouvrent la porte à des perspectives de recherche qu'il faut explorer :

- Possibilité de faire du délestage à grande échelle avec toutes les pièces d'équipement de l'usine et même entre des usines voisines ;
- Possibilité de mieux prévoir les aléas de production à relativement court terme afin de mieux contrôler le délestage.
- Possibilité de faire du délestage « préventif » à faible niveau de puissance, et non seulement lorsqu'il y a danger de dépassement, comme c'est le cas actuellement.

BIBLIOGRAPHIE

CHATTOPADHYAY, D., BHUJANGA B., (2003). A preventive/corrective model for voltage stability incorporating dynamic load-shedding. International Journal of Electrical Power and Energy System, v 25, n 5, June, 2003, p 363-376

CHENG, T.C.E., JANIAK, A., KOLYVANOV, M. (2001). Single Machine Batch Scheduling with resource depending setup and processing times. European Journal of Operations Research p. 177-183

CHENG, T.C.E., WANG, X. (2003). Single machine scheduling with resource dependent release times and processing times, European Journal of Operations Research

CHUNG, C., FLYNN, J. KIRCA, O. (2002) A Branch and Bound Algorithm for Minimizing the Mean Flowtime for an m-Machine Flowshop Problem. International Journal of Production Economics, V. 79, pp. 185-196.

CZUBA, J.S., LAWRENCE, D.J. (1995) Application of an electrical load shedding system to a large refinery, Applications Society 42nd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, p 209-14

EL-SEBAEY, N., YOUSEF, M.T. (2002). An application of Expert Systems for Demand and Side Management. Power system Management and Control, Conference Publication No. 488

GOURGAND M., GRANGEON N., NORRE,S. (2003) a contribution to stochastic flow shop scheduling, European journal of operations research, 151 p. 415-433

GUPTA, J., KRUGGER, K., LAUFF, V., WERNER,F., SOTSKOV, Y. (2002). Heuristics for hybrid flowshops with controllable and assignable due dates. Computers and Operations Research. v.29. p 1417-1439

HAZARIKA, D. SINHA, A.K, (1998). Method for optimal load shedding in case of generation deficiency in a power system. International Journal of Electrical Power and Energy System, v 20, n 6, August, , p 411-420

JANIAK, A., KOLYVANOV., PORTMANN, M.C. (2004). Single machine group scheduling with resource dependent setup and processing times. European journal of operations research p. 142-159

JANIAK, A., KOLYVANOV M. (1996) Single machine Scheduling subject to deadlines and resource dependent processing times. European journal of operations research p. 284-291

JOHNSON, S. M. (1954). Optimal two and three stage production schedules with setup times included. Naval research logistic quarterly. Vol1 p 61-67

KIM, Y.-D., YANO, C.A.,(1994), Due date-based approach to part type selection in flexible manufacturing systems, International Journal of Production Research, Vol 32, num5 p 1027-1043

KOLAHAN, F. LIANG, M. A. (1998). an adaptive TS approach to JIT with variable processing times and sequence depending setups. European journal of operations research p. 142-159

LEINMILLER, M. W, 2003. Total power management for the cement industry
IEEE Cement Industry Technical Conference (Paper), p 97-107

PAL, J.K. HUFF, F.C., (2000), Advantages of an electrical control and energy management system, ISA Transactions, v 39, n 1, p 103-14

PINEDO, M., (2002). Scheduling, theory algorithms and systems. 2nd Ed. New Jersey. Prentice Hall. 586 p.

PINEDO, M., (1982). Minimizing the expected makespan in stochastic flow shops. Operations Research, v 30, n 1, , p 148-162

PIRAUX, S. (2003). Intégration du pilotage des opérations et de la gestion de ressources. Application au cas de Tuyaux Wolverine (Canada) inc. Mémoire de Maîtrise. Ecole Polytechnique de Montréal. Canada

TALUKDAR, B.K., SINHA, A.K., MUKHOPADHYAY, S.; BOSE. (2005). A computationally simple method for cost-efficient generation rescheduling and load shedding for congestion management. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, v 27, n 5-6 p 379-388

TRÉPANIÉ, M., BAPTISTE, P., HAIT, A., ARCINIEGAS, I. (2005). Modélisation des impacts du délestage énergétique sur la production .6e Congrès international de génie industriel Besançon (France)

TZENG, Y.M., CHEN, C.S., HSU, C.T.; CHEN, J.K.; CHANG, W.H. (1996) Design of load shedding scheme for a cogeneration facility: a case study, International Journal of Electrical Power and Energy System, v 18, n 7, , p 431-436

WAGNEUR, E., SRISKANDARAJAH, C. (1992). The two machine permutation flow shop with state dependent processing times, Les cahiers du GERAD. G-92-08

WANG, X., EJEBE, G.C.; TONG, J.; WAIGHT, J.G. (1998). Preventive/corrective control for voltage stability using direct interior point method. IEEE Transactions on Power Systems, v 13, n 3, Aug, 1998, p 878-883

ANNEXE A : TABLEAUX DE RÉSULTATS

Tableau A.1 Résultats des scénarios de la classe A

	P. souscrite	%Debut	Puissance Max	Consommation Totale	Production fours (lb)	Coût total	Coût Fix	Coût variable	Coût par unité
Politique1	10700	95	9898.86	2853627.52	5443041.67	186222.79	117165	69057.79	0.034213
Politique1	10700	90	9885.19	2862619.64	5410483.33	186440.4	117165	69275.4	0.034459102
Politique1	10700	85	9792.64	2901825.55	5395300	187389.18	117165	70224.18	0.034731929
Politique1	9500	95	9887.71	2856767.32	5424016.67	177404.21	108270.44	69133.77	0.032707165
Politique1	9500	90	9875.49	2875261.07	5408241.67	177717.96	108136.64	69581.32	0.032860581
Politique1	9500	85	9851.97	3071211.02	5339116.67	182202.38	107879.08	74323.31	0.034125941
Politique2	10700	95	10025.44	2866553.86	5513308.33	186535.6	117165	69370.6	0.033833697
Politique2	10700	90	10006.42	2869599.22	5331258.33	186609.3	117165	69444.3	0.035002862
Politique2	10700	85	9779.97	2872244.94	5311891.67	186673.33	117165	69508.33	0.035142533
Politique2	9500	95	9849.25	2825013.64	5350416.67	176214.62	107849.29	68365.33	0.032934747
Politique2	9500	90	9820.93	2839657.53	5299850	176258.94	107539.23	68719.71	0.033257345
Politique2	9500	85	9759.69	2843706.21	5287716.67	175686.33	106868.64	68817.69	0.033225368
Politique3	10700	95	10291.69167	3092976.12	5773308.33	192015.02	117165	74850.02	0.033259097
Politique3	10700	90	10219.99	3129834.9	5741625	192907	117165	75742	0.03359798
Politique3	10700	85	10224.52	3148260.75	5688558.33	193352.91	117165	76187.91	0.033989791
Politique3	9500	95	9832.39	3163175.16	5714166.67	184213.59	107664.75	76548.84	0.03223805
Politique3	9500	90	9690.06	3167637.95	5626683.33	182763.01	106106.17	76656.84	0.032481481
Politique3	9500	85	9658.38	3203694.03	5621075	183288.76	105759.37	77529.4	0.032607422
Politique4	10700	95	10099.74074	2839906.2	5496333.33	185890.73	117165	68725.73	0.033820862
Politique4	10700	90	9922.543518	2849431.72	5435383.33	186121.25	117165	68956.25	0.034242525
Politique4	10700	85	9909.480556	2877721.35	5413725	186805.86	117165	69640.86	0.034505974
Politique4	9500	95	9924.301852	2887379.22	5474916.67	178545.68	108671.11	69874.58	0.03261158
Politique4	9500	90	9827.896296	2886745.77	5470758.33	177474.71	107615.46	69859.25	0.032440605
Politique4	9500	85	9796.264815	2904674.72	5410683.33	177562.23	107269.1	70293.13	0.032816969

Tableau A.2 Résultats des scénarios de la classe B

	P. souscrite	debut	Puissance Max.	Consommation kWh	Prod fours (lbs)	Coût total	Coût fix	Coût variable	Coût par lb
Politique1	10700	95	11413.94	3877693.75	5458225.00	218822.83	124982.65	93840.19	0.040090
Politique1	10700	90	11132.72	3877709.27	5478625.00	215743.86	121903.29	93840.56	0.039379
Politique1	10700	85	10825.29	3875833.49	5401800.00	212332.07	118536.90	93795.17	0.039308
Politique1	9500	95	11345.93	3894682.92	5482175.00	247159.04	124237.94	94251.33	0.045084
Politique1	9500	90	11027.07	3897048.25	5506850.00	233521.14	120746.40	94308.57	0.042406
Politique1	9500	85	10673.69	3892844.62	5442050.00	218241.84	116876.91	94206.84	0.040103
Politique2	10700	95	11337.50	3877703.90	5459150.00	217986.01	124145.58	93840.43	0.039930
Politique2	10700	90	11167.67	3823561.67	5289950.00	214816.17	122285.98	92530.19	0.040608
Politique2	10700	85	10865.43	3870639.71	5399475.00	212645.93	118976.45	93669.48	0.039383
Politique2	9500	95	11255.95	3856063.53	5405387.50	242359.73	123252.64	93316.74	0.044837
Politique2	9500	90	11103.26	3846253.20	5240450.00	235564.45	121580.72	93079.33	0.044951
Politique2	9500	85	10655.90	3806957.06	5245850.00	215399.21	116682.09	92128.36	0.041061
Politique3	10700	95	11270.35	4151676.98	5714075.00	223880.87	123410.29	100470.58	0.039181
Politique3	10700	90	11171.14	4013751.45	5696500.00	219456.74	122323.96	97132.79	0.038525
Politique3	10700	85	10664.07	3974154.81	5548925.00	213339.55	117165.00	96174.55	0.038447
Politique3	9500	95	11264.72	3978083.15	5554400.00	245689.25	123348.66	96269.61	0.044233
Politique3	9500	90	10972.63	3923265.78	5631762.50	231817.51	120150.30	94943.03	0.041163
Politique3	9500	85	10694.22	4067181.41	5816525.00	223342.34	117101.66	98425.79	0.038398
Politique4	10700	95	11439.90	3878820.54	5501200.00	219134.39	125266.94	93867.46	0.039834
Politique4	10700	90	11138.42	3846035.82	5423350.00	215039.73	121965.66	93074.07	0.039651
Politique4	10700	85	10679.92	3890980.27	5505350.00	211326.72	117165.00	94161.72	0.038386
Politique4	9500	95	11542.69	3867199.03	5389062.50	239563.03	126392.41	93586.22	0.044454
Politique4	9500	90	11062.01	3810646.03	5328225.00	220172.45	121129.04	92217.63	0.041322
Politique4	9500	85	10663.31	3829812.27	5399425.00	209444.65	116763.20	92681.46	0.038790

ANNEXE B : PLAN D'EXPÉRIENCES

Tableau B.1 Résultats des scénarios de la classe A

Scenario	Politique du délestage	Puissance Souscrite (kWh)	Puissance additionnelle non liée au système productif (kWh)	% Début	Nombre de Tests	Durée par Tournée de chaque test
1	1	10700	0	95	12	7m 10 s
2	1	10700	0	90	12	7m 10 s
3	1	10700	0	85	12	7m 10 s
4	1	9500	0	95	12	7m 10 s
5	1	9500	0	90	12	7m 10 s
6	1	9500	0	85	12	7m 10 s
7	2	10700	0	95	12	8m 30 s
8	2	10700	0	90	12	8m 30 s
9	2	10700	0	85	12	8m 30 s
10	2	9500	0	95	12	8m 30 s
11	2	9500	0	90	12	8m 30 s
12	2	9500	0	85	12	8m 30 s
13	3	10700	0	95	12	8m 50 s
14	3	10700	0	90	12	8m 50 s
15	3	10700	0	85	12	8m 50 s
16	3	9500	0	95	12	8m 50 s
17	3	9500	0	90	12	8m 50 s
18	3	9500	0	85	12	8m 50 s
19	4	10700	0	95	12	9m 25 s
20	4	10700	0	90	12	9m 25 s
21	4	10700	0	85	12	9m 25 s
22	4	9500	0	95	12	9m 25 s
23	4	9500	0	90	12	9m 25 s
24	4	9500	0	85	12	9m 25 s

Tableau B. 2 Plan d'expériences de la classe B

Scenario	Politique du délestage	Puissance Souscrite (kWh)	Puissance additionnelle non liée au système productif (kWh)	% Début	Nombre de Tests	Durée par Tournée de chaque test
25	1	10700	2000	95	12	7m 10 s
26	1	10700	2000	90	12	7m 10 s
27	1	10700	2000	85	12	7m 10 s
28	1	9500	2000	95	12	7m 10 s
29	1	9500	2000	90	12	7m 10 s
30	1	9500	2000	85	12	7m 10 s
31	2	10700	2000	95	12	8m 30 s
32	2	10700	2000	90	12	8m 30 s
33	2	10700	2000	85	12	8m 30 s
34	2	9500	2000	95	12	8m 30 s
35	2	9500	2000	90	12	8m 30 s
36	2	9500	2000	85	12	8m 30 s
37	3	10700	2000	95	12	8m 50 s
38	3	10700	2000	90	12	8m 50 s
39	3	10700	2000	85	12	8m 50 s
40	3	9500	2000	95	12	8m 50 s
41	3	9500	2000	90	12	8m 50 s
42	3	9500	2000	85	12	8m 50 s
43	4	10700	2000	95	12	9m 25 s
44	4	10700	2000	90	12	9m 25 s
45	4	10700	2000	85	12	9m 25 s
46	4	9500	2000	95	12	9m 25 s
47	4	9500	2000	90	12	9m 25 s
48	4	9500	2000	85	12	9m 25 s

ANNEXE C : FIGURES MODÈLES DE SIMULATION

AVEC TAYLOR ED.

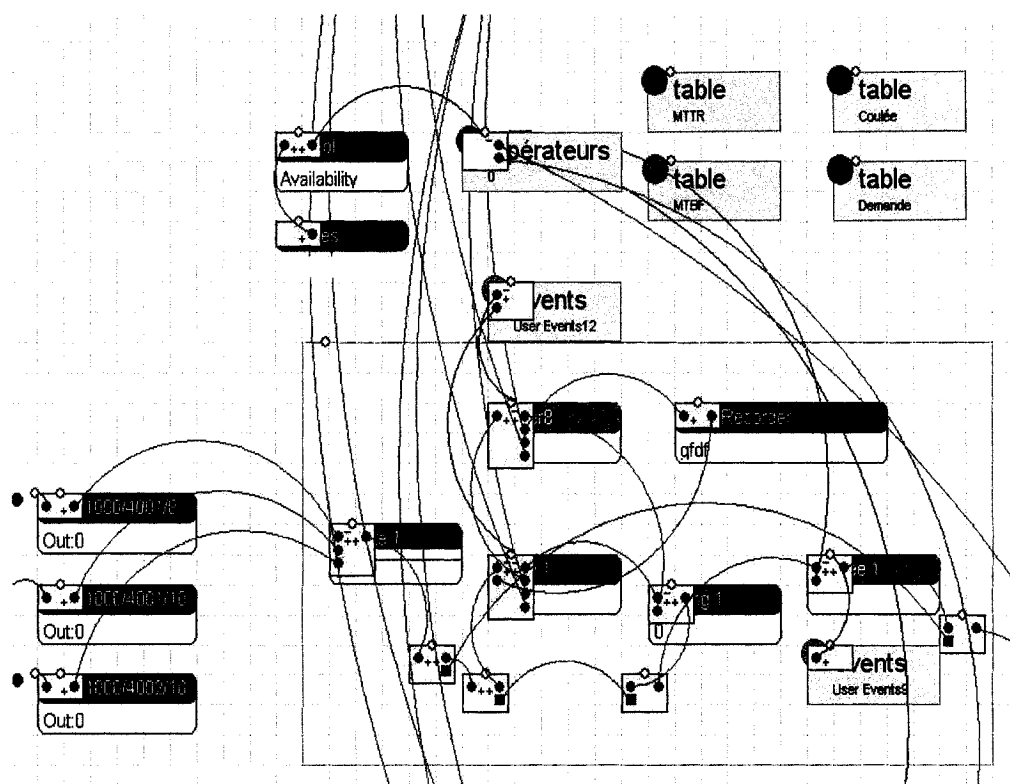


Figure C-1 Modèle taylorEd Four #1 et Données d'entrée

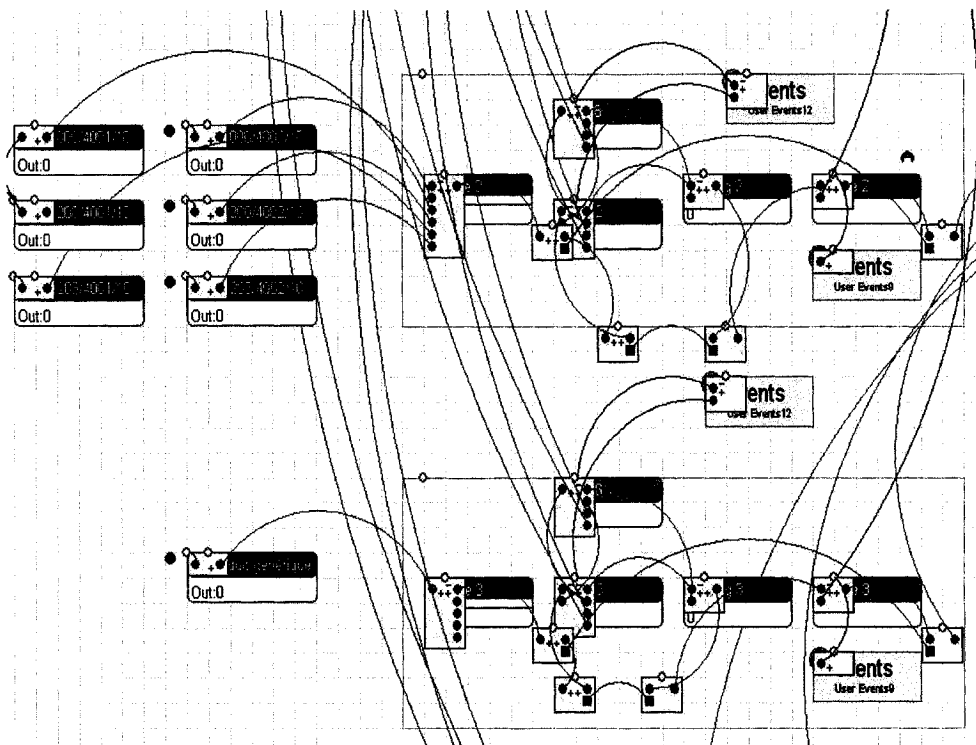


Figure C-2 Modèle taylorEd Four #1 et Four #2

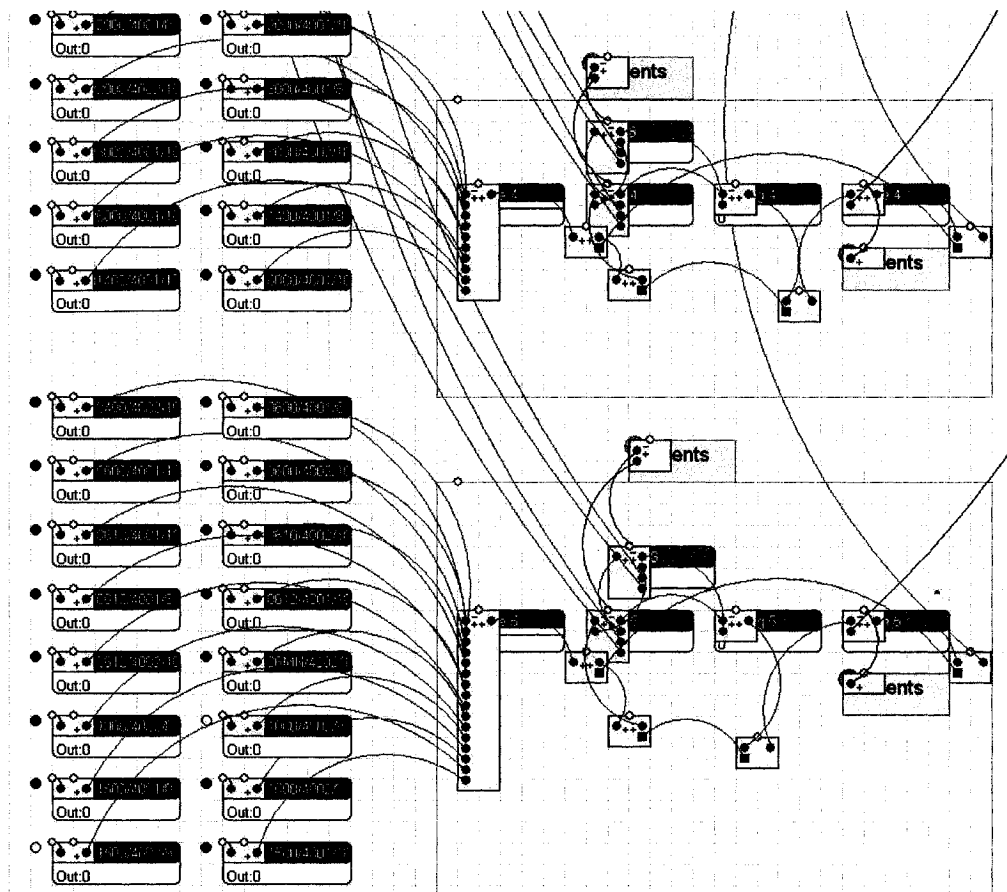


Figure C-3 Modèle taylorEd Four #4 Four #5

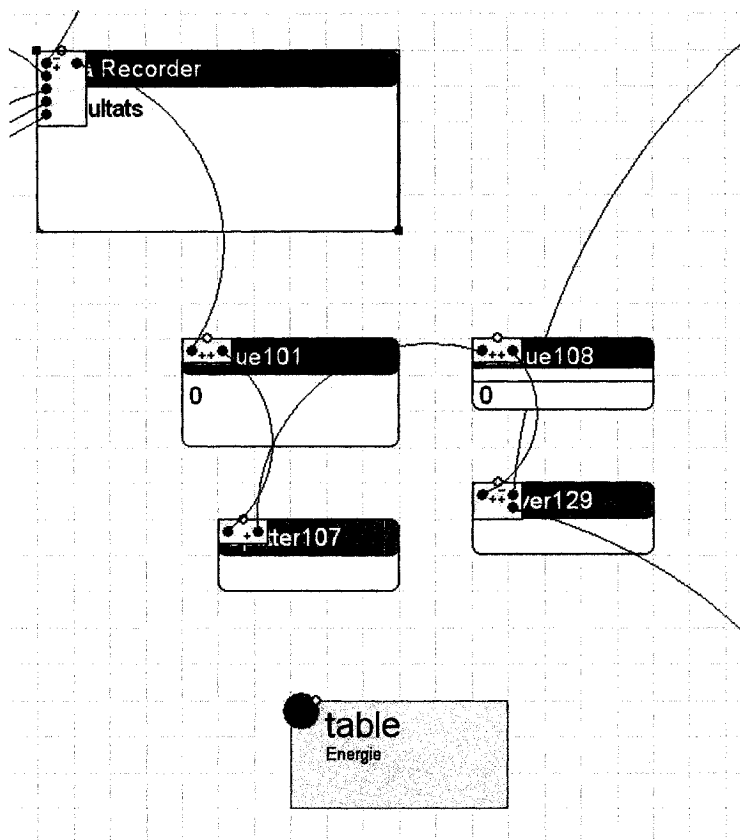


Figure C-4 Modèle taylorEd Découpage

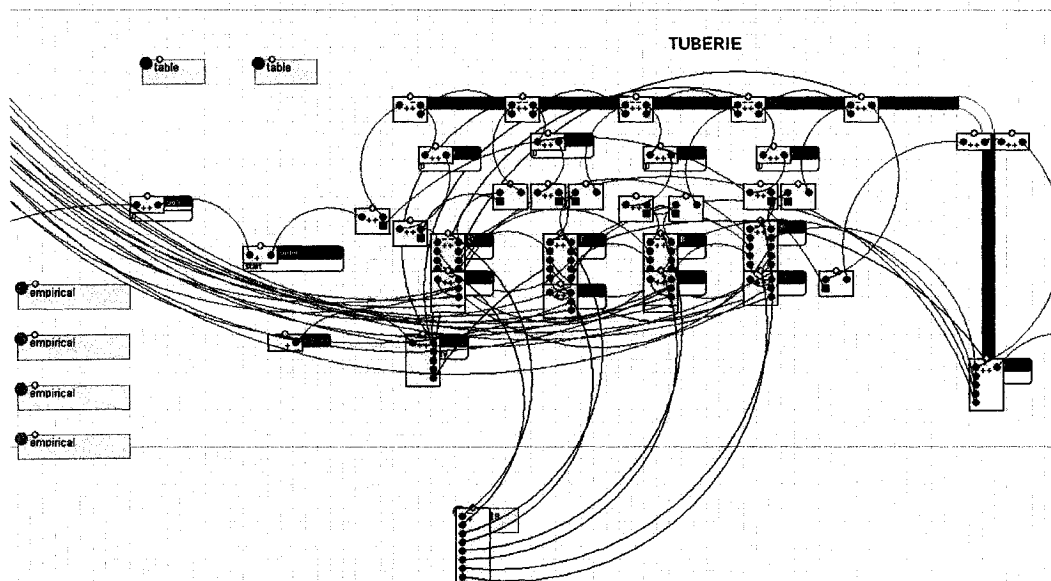


Figure C-5 Modèle taylorEd Presse # 1: Tuberie

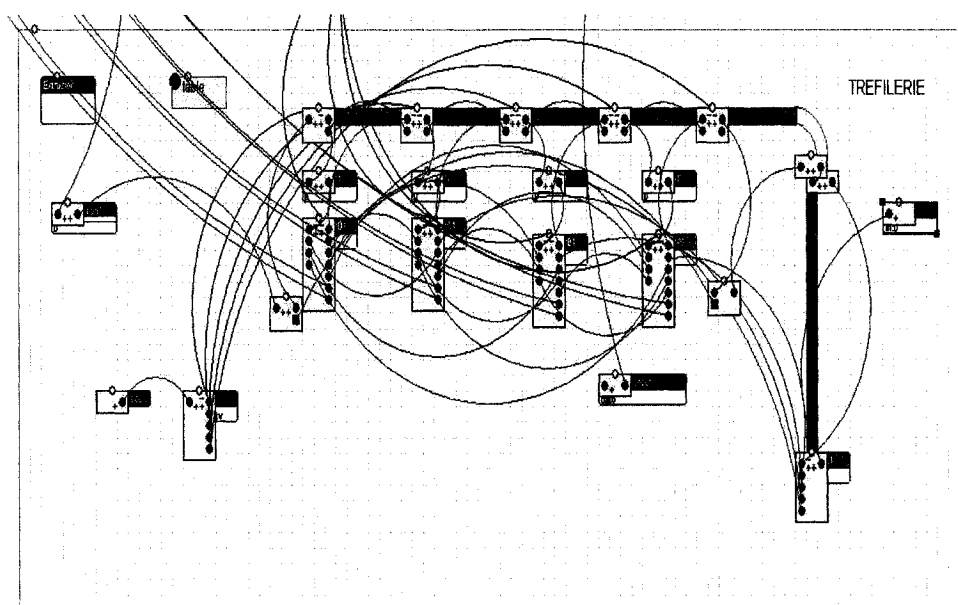


Figure C-6 Modèle taylorEd Presse #2 Tréfilerie

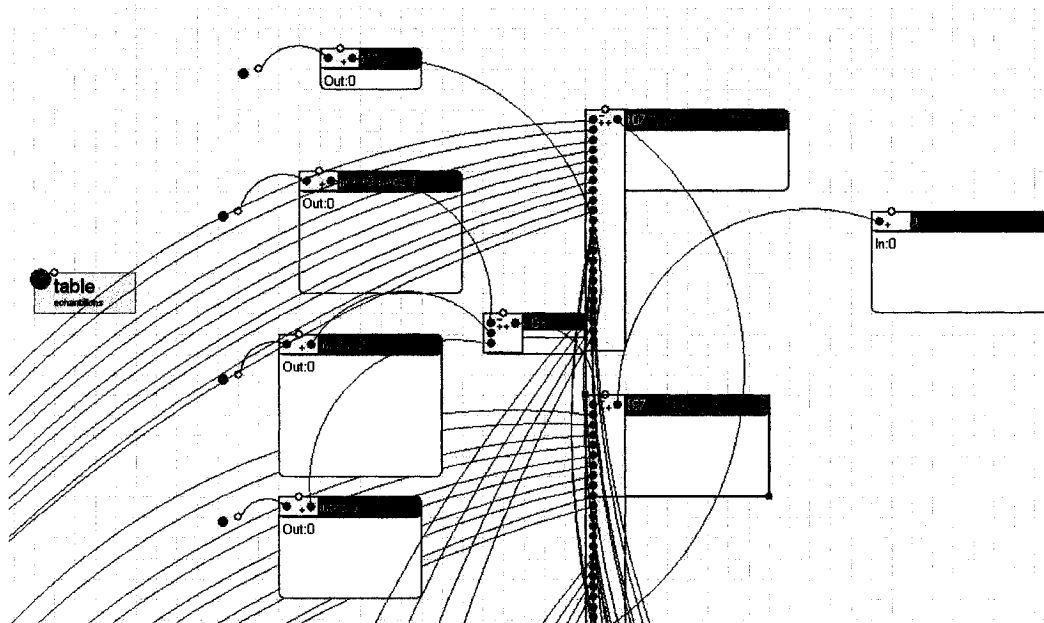


Figure C-7 taylorEd Sousmodèle auxiliaire, Control du délestage

ANNEXE D : CODE DE PROGRAMMATION DANS TAYLOR ED.

Tableau D.1 TaylorEd Code Modules d'arrivée d'entités aux fours

Atom Name :	1- C11000/4001/8 (Source)
Inter Arrival time	negexp(Demande(1,1))
Send to :	1
Trigger on Entry	setlabel([Produit],1,i)
Trigger on Exit	do(setlabel([Ligne],1,i), setlabel([types],1,i), setlabel([diametre],8,i), setlabel([presse],1,i))

Tableau D.2 TaylorEd Code File d'attente #1 aux fours

Atom Name :	Attente 1 (Queue)
Send to :	1
Trigger on Entry	do(setlabel([Creation],string(time,0,0),i), setlabel([entree],i))
Trigger on Exit	do(setlabel([dureefonte],normal(7200,200),i), setlabel([tcumule],0.1,i))

Tableau D.3 TaylorEd code Serveurs aux Fours

Atom Name :	Four1
Send to :	if (label([tcumule],first(c))>=label([dureefonte],first(c)),1,2)
Trigger on Entry	do(c.putilise:= label([Pdisp],c), i.tcumule:=i.tcumule+10*(c.Pdisp/2000), if (label([tcumule],first(c))+0<=label([dureefonte],first(c)) ,c.putilisefut:=c.putilise,c.putilisefut:=1))
Trigger on Exit	do(if (i.tcumule>=i.dureefonte, setlabel([putilise],150,c),setlabel([putilise],1,c)), c.putilisefut:=3)

Tableau D.4 TaylorEd Code File d'attente #2 Avant la coulée

Atom Name :	Attente 2 (Queue)
Send to :	1
Trigger on Entry	do(setlabel([Fin_Fonte],string(time,0,0),i), setlabel([putilisefut], 4,in(1,c)), setlabel([putilisefut], 4,in(2,c)))
Trigger on Exit	setlabel([Duree_Coulee],normal(Coulée(i.Produit,1),100),i)

Tableau D.5 TaylorEd Coulée

Atom Name :	Coulée 2
Send to :	1
Trigger on Entry	calloperators(in(2,c),1,1,[Red])
Trigger on Exit	freecoperators(in(2,c),i)

Tableau D.6 TaylorEd Code File d'attente #1 aux presses

Atom Name :	Zone tampon (Queue)
Send to :	1
Trigger on Entry	do(setlabel([chauffe],max(chauffage(i.types,3),min(chauffage(i.types,4),normal(chauffage(i.types,1),chauffage(i.types,2))))),i), setlabel([extrusion],max(Extrusion(i.types,3),min(Extrusion(i.types,4),normal(Extrusion(i.types,1),Extrusion(i.types,2))))),i), setlabel([setup_induction],normal(mins(17),mins(3)),i), setlabel([setup_presse],normal(hr(1.5),mins(10)),i), i.complete:=0.1)
Trigger on Exit	

Tableau D.7 TaylorEd Code Inducteurs aux presses

Atom Name :	InducteurA
Send to :	if (label([chauffe],first(c))>=label([complete],first(c)),7,1)
Trigger on Entry	<pre> do(setlabel([pret],time+i.chauffe,c), setlabel([putilise],c.Pdisp,c), if (label([chauffe],first(c))>=label([complete],first(c))+0, c.putilisefut:=label([Pdisp],c),c.putilisefut:=1)) </pre>
Trigger on Exit	<pre> do(if(i.complete>i.chauffe, do(closeoc(1,c), closeoc(1,(in(2,c))), closeoc(1,(in(3,c))), closeoc(1,(in(4,c))), set(color(i),colorred), setlabel([test1],i.longueur,c), setlabel([testt],i.type,c), setlabel([putilise],1,c)), i.complete:=i.complete+10), setlabel([putilise],1,c), c.putilisefut:=2) </pre>

Tableau D.8 TaylorEd Code Extrusion

Atom Name :	Extrusion
Send to :	1
Cycletime	i.extrusion
Trigger on Exit	<pre> iff(<(content(c),3), iff(= (and(and(<(label([pret],in(2,c)),label([pret],in(3,c))),<(label([pret],in(2,c)),label([pret],in(4,c)))), <(label([pret],in(2,c)),label([pret],in(5,c))))),1), openoutput(in(2,c)), iff(=and(<(label([pret],in(3,c)),label([pret],in(4,c))),<(label([pret],in(3,c)),label([pret],in(5,c))))),1), openoutput(in(3,c)), iff(<(label([pret],in(4,c)),label([pret],in(5,c))), openoutput(in(4,c)), openoutput(in(5,c)))))) </pre>

Tableau D.9 TaylorEd Code de délestage, arrivée des entités Auxiliaires

Atom Name :	Auxiliaire 10 secs 1
Inter Arrival time	if(output<1, 9.90,10)
Send to :	1
Trigger on Entry	i.instant:=1

Tableau D.10 TaylorEd Code de délestage, arrivée des entités Auxiliaires

Atom Name :	10 seconds 2
Inter Arrival time	10
Send to :	1
Trigger on Entry	i.instant:=2

Tableau D.11 TaylorEd Code de délestage, Fin de l'intervalle

Atom Name :	15 minutes 3
Inter Arrival time	mins(15)
Send to :	1
Trigger on Entry	i.instant:=3

Tableau D.12 TaylorEd Code Processus du delestage Politique #4

Atom Name :	Server107
Send to :	1
Trigger on Entry	<pre> do(c.offset:= 0.07, if(input<3, do(c.row:=1, c.puissance:=1, c.abcd:=1, c.demande :=1, c.compte:= 0, c.accumule:=0, c.max:=1,c.indice:=1)), if(i.instant=1, do(c.compte:=c.compte+1, c.demande1:= trunc(label([putilisefut],in(10,c))+ label([putilisefut],in(1,c))+ label([putilisefut],in(2,c))+ label([putilisefut],in(3,c))+ label([putilisefut],in(4,c))+ label([putilisefut],in(5,c))+ label([putilisefut],in(6,c))+ label([putilisefut],in(7,c))+ label([putilisefut],in(8,c))+ label([putilisefut],in(9,c))), c.demande2:= trunc(label([putilisefut],in(12,c))+ label([putilisefut],in(13,c))+ label([putilisefut],in(14,c))+ label([putilisefut],in(15,c))+ label([putilisefut],in(16,c))+ label([putilisefut],in(17,c))+ label([putilisefut],in(18,c))+ label([putilisefut],in(11,c))), c.demande3:= trunc(label([putilisefut],in(20,c))+ label([putilisefut],in(21,c))+ label([putilisefut],in(22,c))+ label([putilisefut],in(19,c))), c.demandefut:= trunc(c.demande1+c.demande2+c.demande3)) c.demande1:= trunc(label([putilise],in(2,c))+ label([putilise],in(3,c))+ label([putilise],in(4,c))+ </pre>

```

label([putilise],in(5,c))+
label([putilise],in(6,c))+
label([putilise],in(7,c))+
label([putilise],in(8,c))+
label([putilise],in(9,c))+
label([putilise],in(10,c))+
label([putilise],in(11,c))),

c.demande2:= trunc(
label([putilise],in(12,c))+
label([putilise],in(13,c))+
label([putilise],in(14,c))+
label([putilise],in(15,c))+
label([putilise],in(20,c))+
label([putilise],in(21,c))+
label([putilise],in(22,c))+
label([putilise],in(23,c))),

c.demande3:= trunc(
label([putilise],in(16,c))+
label([putilise],in(17,c))+
label([putilise],in(18,c))+
label([putilise],in(19,c))),

c.demande:= trunc(c.demande1+c.demande2+c.demande3),

c.indice:=1+c.indice,

c.pulses:=(c.demande,90),14),
c.accumule:=c.accumule+c.pulses,
c.demaccumule:=c.accumule*14,

setlabel([puissance],c.demaccumule,c)

)
),
if(i.instant=3,
do(
setcell(c.row,1,c.puissance,refEnergie),
setcell(c.row,2,c.pulses,refEnergie),
c.row:=c.row+1,
c.compte:=0,
c.puissance:= 0,c.accumule:=0,c.demande:=0,
setlabel([Pdisp],2000,in(2,c)),
setlabel([Pdisp],2000,in(3,c)),
setlabel([Pdisp],2000,in(4,c)),
setlabel([Pdisp],2000,in(5,c)),
setlabel([Pdisp],2000,in(10,c)),
setlabel([Pdisp],2000,in(11,c)),
setlabel([Pdisp],750,in(12,c)),
setlabel([Pdisp],750,in(13,c)),
setlabel([Pdisp],750,in(14,c)),
setlabel([Pdisp],750,in(15,c)),
setlabel([Pdisp],750,in(20,c)),
setlabel([Pdisp],750,in(21,c)),
setlabel([Pdisp],750,in(22,c)),
setlabel([Pdisp],750,in(23,c))
)
),
)
)

```

Trigger on Exit	<pre> Do(if(input=1, c.dispo:=1, if(i.instant=1, c.dispo:= label([Pdisp],in(2,c))+ label([Pdisp],in(3,c))+ label([Pdisp],in(4,c))+ label([Pdisp],in(5,c))+ label([Pdisp],in(6,c))+ label([Pdisp],in(7,c))+ label([Pdisp],in(8,c))+ label([Pdisp],in(9,c))+ label([Pdisp],in(10,c))+ label([Pdisp],in(11,c))+ label([Pdisp],in(12,c))+ label([Pdisp],in(13,c))+ label([Pdisp],in(14,c))+ label([Pdisp],in(15,c))+ label([Pdisp],in(16,c))+ label([Pdisp],in(17,c))+ label([Pdisp],in(18,c))+ label([Pdisp],in(19,c))+ label([Pdisp],in(20,c))+ label([Pdisp],in(21,c))+ label([Pdisp],in(22,c))+ label([Pdisp],in(23,c)))), if(i.instant=2, do(c.debut:=0.95, if(c.compte>=2, c.max:=(c.accumule,echantillons(c.compte,1)), c.max:=1), c.sortie:=1/((1-c.max),(1-c.debut)),c.offset), if(c.sortie<0.5, c.sortie:=0.5), if(c.sortie>1, c.sortie:=1), do(if(c.sortiefut>=c.sortie,c.nouveauP:=1000*(c.sortie+c.sortiefut),c.nouveauP:=2000*(c.sortie)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(2,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(3,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(4,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(5,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(10,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(11,c)), if(c.sortiefut>=c.sortie,c.nouveauP:=500*(c.sortie+c.sortiefut),c.nouveauP:=1000*(c.sortie)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(12,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(13,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(14,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(15,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(20,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(21,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(22,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(23,c)),))) </pre>
-----------------	---

Tableau D.13 TaylorEd Code Processus de délestage Politique #3

Atom Name :	Server107
Send to :	1
Trigger on Entry	<pre> do(c.offset:= 0.07, if(input<3,do(c.row:=1,c.puissance:=1,c.abcd:=1, c.demande:=1,c.compte:=0, c.accumule:=0,c.max:=1,c.indice:=1)), if(i.instant=1, do(c.compte:=c.compte+1, c.demande1:= trunc(label([putilise],in(2,c))+ label([putilise],in(3,c))+ label([putilise],in(4,c))+ label([putilise],in(5,c))+ label([putilise],in(6,c))+ label([putilise],in(7,c))+ label([putilise],in(8,c))+ label([putilise],in(9,c))+ label([putilise],in(10,c))+ label([putilise],in(11,c))), c.demande2:= trunc(label([putilise],in(12,c))+ label([putilise],in(13,c))+ label([putilise],in(14,c))+ label([putilise],in(15,c))+ label([putilise],in(20,c))+ label([putilise],in(21,c))+ label([putilise],in(22,c))+ label([putilise],in(23,c))), c.demande3:= trunc(label([putilise],in(16,c))+ label([putilise],in(17,c))+ label([putilise],in(18,c))+ label([putilise],in(19,c))), c.demande:= trunc(c.demande1+c.demande2+c.demande3), c.indice:=1+c.indice, c.pulses:=/(c.demande,90),14), c.accumule:=c.accumule+c.pulses, c.demaccumule:=c.accumule*14, setlabel([puissance],c.demaccumule,c))), if(i.instant=3, do(setcell(c.row,1,c.puissance,refEnergie), setcell(c.row,2,c.pulses,refEnergie), c.row:=c.row+1, c.compte:=0, c.puissance:= 0,c.accumule:=0,c.demande:=0, setlabel([Pdisp],2000,in(2,c)), setlabel([Pdisp],2000,in(3,c)), </pre>

	<pre> setlabel([Pdisp],2000,in(4,c)), setlabel([Pdisp],2000,in(5,c)), setlabel([Pdisp],2000,in(10,c)), setlabel([Pdisp],2000,in(11,c)), setlabel([Pdisp],750,in(12,c)), setlabel([Pdisp],750,in(13,c)), setlabel([Pdisp],750,in(14,c)), setlabel([Pdisp],750,in(15,c)), setlabel([Pdisp],750,in(20,c)), setlabel([Pdisp],750,in(21,c)), setlabel([Pdisp],750,in(22,c)), setlabel([Pdisp],750,in(23,c))))) </pre>
Trigger on Exit	<pre> do(if(input=1, c.dispo:=1, if(i.instant=1, c.dispo:= label([Pdisp],in(2,c))+ label([Pdisp],in(3,c))+ label([Pdisp],in(4,c))+ label([Pdisp],in(5,c))+ label([Pdisp],in(6,c))+ label([Pdisp],in(7,c))+ label([Pdisp],in(8,c))+ label([Pdisp],in(9,c))+ label([Pdisp],in(10,c))+ label([Pdisp],in(11,c))+ label([Pdisp],in(12,c))+ label([Pdisp],in(13,c))+ label([Pdisp],in(14,c))+ label([Pdisp],in(15,c))+ label([Pdisp],in(16,c))+ label([Pdisp],in(17,c))+ label([Pdisp],in(18,c))+ label([Pdisp],in(19,c))+ label([Pdisp],in(20,c))+ label([Pdisp],in(21,c))+ label([Pdisp],in(22,c))+ label([Pdisp],in(23,c)))), if(i.instant=2, do(c.debut:=0.95, if(c.compte>=2, c.max:=(c.accumule,echantillons(c.compte,1)), c.max:=1), c.sortie:=(((1-c.max),(1-c.debut)),c.offset), if(c.sortie<0.5, c.sortie:=0.5), if(c.sortie>1, c.sortie:=1), do(c.de1:=label([putilise],in(2,c))+label([putilise],in(3,c)), c.de2:=label([putilise],in(4,c))+label([putilise],in(5,c)), c.de3:=label([putilise],in(10,c))+label([putilise],in(11,c)), do(</pre>

	<pre> c.nouveauP:=2000*c.sortie, c.nouveauP2:=2000*c.sortie, c.nouveauP3:=2000*c.sortie, if(and(c.de1>c.de2,c.de1>c.de3), c.nouveau:=c.nouveau*1.2), if(and(c.de2>c.de1,c.de2>c.de3), c.nouveau2:=c.nouveau2*1.2), if(and(c.de3>c.de2,c.de3>c.de1), c.nouveau3:=c.nouveau3*1.2), if(and(c.de1<c.de2,c.de1<c.de3), c.nouveau:=c.nouveau*0.8), if(and(c.de2<c.de1,c.de2<c.de3), c.nouveau2:=c.nouveau2*0.8), if(and(c.de3<c.de2,c.de3<c.de1), c.nouveau3:=c.nouveau3*0.8), do(if(c.nouveauP2>=2000, c.nouveauP2:=2000), if(c.nouveauP>=2000, c.nouveauP:=2000), if(c.nouveauP3>=2000, c.nouveauP3:=2000), if(c.nouveauP<=1000, c.nouveauP:=1000), if(c.nouveauP2<=1000, c.nouveauP2:=1000), if(c.nouveauP3<=1000, c.nouveauP3:=1000))), setlabel([Pdisp],c.nouveauP3,in(2,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP3,in(3,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(4,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(5,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP2,in(10,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP2,in(11,c)), c.nouveauP:=1000*c.sortie, setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(12,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(13,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(14,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(15,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(20,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(21,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(22,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(23,c))))) </pre>
--	--

Tableau D.14 TaylorEd Code Processus de délestage Politique #2

Atom Name :	Server107
Send to :	1
Trigger on Entry	<pre> do(c.offset:= 0.07, if(input<3,do(c.row:=1,c.puissance:=1,c.abcd:=1, c.demande:=1,c.compte:=0, c.accumule:=0,c.max:=1,c.indice:=1)), if(i.instant=1, do(c.compte:=c.compte+1, c.demande1:= trunc(label([putilise],in(2,c))+ label([putilise],in(3,c))+ label([putilise],in(4,c))+ label([putilise],in(5,c))+ label([putilise],in(6,c))+ label([putilise],in(7,c))+ label([putilise],in(8,c))+ label([putilise],in(9,c))+ label([putilise],in(10,c))+ label([putilise],in(11,c))), c.demande2:= trunc(label([putilise],in(12,c))+ label([putilise],in(13,c))+ label([putilise],in(14,c))+ label([putilise],in(15,c))+ label([putilise],in(20,c))+ label([putilise],in(21,c))+ label([putilise],in(22,c))+ label([putilise],in(23,c))), c.demande3:= trunc(label([putilise],in(16,c))+ label([putilise],in(17,c))+ label([putilise],in(18,c))+ label([putilise],in(19,c))), c.demande:= trunc(c.demande1+c.demande2+c.demande3), setcell(trunc(mod(c.indice,60)),1,c.demande,reftablaaux), setcell(trunc(mod(c.indice,60)),2,c.demande1,reftablaaux), setcell(trunc(mod(c.indice,60)),3,c.demande2,reftablaaux), setcell(trunc(mod(c.indice,60)),4,c.demande3,reftablaaux), c.indice:=1+c.indice, c.pulses:=/(c.demande,90),14), c.accumule:=c.accumule+c.pulses, c.demaccumule:=c.accumule*14, setlabel([puissance],c.demaccumule,c))), if(i.instant=3, do(setcell(c.row,1,c.puissance,refEnergie), setcell(c.row,2,c.pulses,refEnergie), c.row:=c.row+1, c.compte:=0, c.puissance:= 0,c.accumule:=0,c.demande:=0, setlabel([Pdisp],2000,in(2,c)), </pre>

	<pre> setlabel([Pdisp],2000,in(3,c)), setlabel([Pdisp],2000,in(4,c)), setlabel([Pdisp],2000,in(5,c)), setlabel([Pdisp],2000,in(10,c)), setlabel([Pdisp],2000,in(11,c)), setlabel([Pdisp],750,in(12,c)), setlabel([Pdisp],750,in(13,c)), setlabel([Pdisp],750,in(14,c)), setlabel([Pdisp],750,in(15,c)), setlabel([Pdisp],750,in(20,c)), setlabel([Pdisp],750,in(21,c)), setlabel([Pdisp],750,in(22,c)), setlabel([Pdisp],750,in(23,c))))) </pre>
Trigger on Exit	<pre> do(if(input=1, c.dispo:=1, if(i.instant=1, c.dispo:= label([Pdisp],in(2,c))+ label([Pdisp],in(3,c))+ label([Pdisp],in(4,c))+ label([Pdisp],in(5,c))+ label([Pdisp],in(6,c))+ label([Pdisp],in(7,c))+ label([Pdisp],in(8,c))+ label([Pdisp],in(9,c))+ label([Pdisp],in(10,c))+ label([Pdisp],in(11,c))+ label([Pdisp],in(12,c))+ label([Pdisp],in(13,c))+ label([Pdisp],in(14,c))+ label([Pdisp],in(15,c))+ label([Pdisp],in(16,c))+ label([Pdisp],in(17,c))+ label([Pdisp],in(18,c))+ label([Pdisp],in(19,c))+ label([Pdisp],in(20,c))+ label([Pdisp],in(21,c))+ label([Pdisp],in(22,c))+ label([Pdisp],in(23,c)))), if(i.instant=2, do(c.debut:=0.965, if(c.compte>=2, c.max:=(c.accumule,echantillons(c.compte,1)), c.max:=1), c.sortie:=1/((1-c.max),(1-c.debut)),c.offset), if(c.sortie<0.5, c.sortie:=0.5), if(c.sortie>1, c.sortie:=1), do(c.nouveaup:=2000*c.sortie, c.nouveaup2:=2000*c.sortie*1.2, c.nouveaup3:=2000*c.sortie*0.8, if(c.nouveaup2>=2000, c.nouveaup2:=2000), if(c.nouveaup3<=1000, c.nouveaup3:=1000), </pre>

	<pre>setlabel([Pdisp],c.nouveauP3,in(2,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP3,in(3,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(4,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(5,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP2,in(10,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP2,in(11,c)), c.nouveauP:=1000*c.sortie, setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(12,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(13,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(14,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(15,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(20,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(21,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(22,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(23,c)))))</pre>
--	--

Tableau D.15 TaylorEd Code Processus de délestage Politique #1

Atom Name :	Server107
Send to :	1
Trigger on Entry	<pre> Do(c.offset:= 0.07, if(input<3,do(c.row:=1,c.puissance:=1,c.abcd:=1, c.demande:=1,c.compte:=0, c.accumule:=0,c.max:=1,c.indice:=1)), if(i.instant=1, do(c.compte:=c.compte+1, c.demande1:= trunc(label([putilise],in(2,c))+ label([putilise],in(3,c))+ label([putilise],in(4,c))+ label([putilise],in(5,c))+ label([putilise],in(6,c))+ label([putilise],in(7,c))+ label([putilise],in(8,c))+ label([putilise],in(9,c))+ label([putilise],in(10,c))+ label([putilise],in(11,c))), c.demande2:= trunc(label([putilise],in(12,c))+ label([putilise],in(13,c))+ label([putilise],in(14,c))+ label([putilise],in(15,c))+ label([putilise],in(20,c))+ label([putilise],in(21,c))+ label([putilise],in(22,c))+ label([putilise],in(23,c))), c.demande3:= trunc(label([putilise],in(16,c))+ label([putilise],in(17,c))+ label([putilise],in(18,c))+ label([putilise],in(19,c))), c.demande:= trunc(c.demande1+c.demande2+c.demande3), setcell(trunc(mod(c.indice,60)),1,c.demande,reftablaaux), setcell(trunc(mod(c.indice,60)),2,c.demande1,reftablaaux), setcell(trunc(mod(c.indice,60)),3,c.demande2,reftablaaux), setcell(trunc(mod(c.indice,60)),4,c.demande3,reftablaaux), c.indice:=1+c.indice, c.pulses:=/(c.demande,90),14), c.accumule:=c.accumule+c.pulses, c.demaccumule:=c.accumule* 14, setlabel([puissance],c.demaccumule,c))), if(i.instant=3, do(setcell(c.row,1,c.puissance,refEnergie), setcell(c.row,2,c.pulses,refEnergie), c.row:=c.row+1, c.compte:=0, c.puissance:= 0,c.accumule:=0,c.demande:=0, setlabel([Pdisp],2000,in(2,c)), </pre>

	<pre> setlabel([Pdisp],2000,in(3,c)), setlabel([Pdisp],2000,in(4,c)), setlabel([Pdisp],2000,in(5,c)), setlabel([Pdisp],2000,in(10,c)), setlabel([Pdisp],2000,in(11,c)), setlabel([Pdisp],750,in(12,c)), setlabel([Pdisp],750,in(13,c)), setlabel([Pdisp],750,in(14,c)), setlabel([Pdisp],750,in(15,c)), setlabel([Pdisp],750,in(20,c)), setlabel([Pdisp],750,in(21,c)), setlabel([Pdisp],750,in(22,c)), setlabel([Pdisp],750,in(23,c))))) </pre>
Trigger on Exit	<pre> Do(if(input=1, c.dispo:=1, if(i.instant=1, c.dispo:= label([Pdisp],in(2,c))+ label([Pdisp],in(3,c))+ label([Pdisp],in(4,c))+ label([Pdisp],in(5,c))+ label([Pdisp],in(6,c))+ label([Pdisp],in(7,c))+ label([Pdisp],in(8,c))+ label([Pdisp],in(9,c))+ label([Pdisp],in(10,c))+ label([Pdisp],in(11,c))+ label([Pdisp],in(12,c))+ label([Pdisp],in(13,c))+ label([Pdisp],in(14,c))+ label([Pdisp],in(15,c))+ label([Pdisp],in(16,c))+ label([Pdisp],in(17,c))+ label([Pdisp],in(18,c))+ label([Pdisp],in(19,c))+ label([Pdisp],in(20,c))+ label([Pdisp],in(21,c))+ label([Pdisp],in(22,c))+ label([Pdisp],in(23,c)))), if(i.instant=2, do(c.debut:=0.965, if(c.compte>=2, c.max:=(c.accumule,echantillons(c.compte,1)), c.max:=1), c.sortie:= -(((1-c.max),(1-c.debut)),c.offset), if(c.sortie<0.5, c.sortie:=0.5), if(c.sortie>1, c.sortie:=1), do(c.nouveauP:=2000*c.sortie, setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(2,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(3,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(4,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(5,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(10,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(11,c)), c.nouveauP:=1000*c.sortie, setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(12,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(13,c)), </pre>

	<pre>setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(14,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(15,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(20,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(21,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(22,c)), setlabel([Pdisp],c.nouveauP,in(23,c)))))</pre>
--	---